

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODIJEL  
*Stručni studij Mehatronike*

Mateo Župan  
**Optimiranje aktivne izolacije  
klipnog kompresora**  
Završni rad

Karlovac, 2015/2016.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODIJEL  
*Stručni studij Mehatronike*

Mateo Župan  
**Optimiranje vibracija klipnog  
kompresora**  
Završni rad

Mentor: dr.sc. Josip Hoster

Karlovac, 2015/2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom voditelju rada, profesoru dr. sc. Josipu Hosteru na mentorstvu, savjetima i pruženoj pomoći. Zahvaljujem se i mojoj obitelji što su bili uz mene za vrijeme studiranja i izrade diplomskog rada.

Mateo Župan

# VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni

studij:.....

.....MEHATRONIKE.....

Usmjerenje:.....Karlovac, ..... 24.06.2016.

.....

## ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student:..... MATEO ŽUPAN .....

Naslov:.....Optimiranje aktivne izolacije klipnog kompresora.....

.....

Opis zadatka:

Zadatak završnog rada je optimirati aktivnu izolaciju kompresora, odnosno silu prenesenu na okolinu preko elastičnih i prigušnih elemenata koji spajaju temeljnu ploču i okolinu (podlogu). Klipni kompresor je pogonjen trofaznim asinkronim kaveznim elektromotorom snage 5,5 kW pri  $2920 \text{ min}^{-1}$ , uz prijenosni odnos remenskog prijenosa  $i = 2,1$ . Kompresor ima 2 klipa smještena pod  $0^\circ$ , u "nizu", te se koristi za komprimiranje zraka okolišnjih veličina stanja do pretlaka 8 bara. Radni volumen svakog cilindra je  $0,43 \text{ dm}^3$ , a teorijska dobava kompresora je 1200 L/min. Poznate su mase i geometrija klipa, klipnjače, koljenastog vratila i ostalih dijelova kompresora, te elektromotora i spremnika zraka od 500 L. Masa i geometrija temeljne ploče su zadane. Poznata je momentna karakteristika elektromotora. Sklop kompresora kao cjeline (elektromotor, kompresor i spremnik) je kruto vezan na temeljnu ploču. Ispod temeljne ploče su predviđeni elastični i prigušni elementi kojima se sustav veže sa okolinom (podlogom). Potrebno je analizirati vibracijsko ponašanje kompresora od pokretanja do ustaljenog rada.

Optimiranje aktivne izolacije predstavlja smanjenje prenesene sile kompresora na okolinu od pokretanja elektromotora do ustaljenog rada (prijelazno razdoblje). Prioritet pri postavljanju kriterija (težinskog faktora) kvalitete izolacije ima ustaljen rad kompresora. Podloga je armiranobetonska ploča, koju treba pretpostaviti krutom. Zadatak treba riješiti koristeći numeričku metodu pretpostavljenog rješenja, pomoću računala. Za pretpostavljeno rješenje po dijelovima vremenske domene uzeti polinom trećeg stupnja. Rezultate usporediti s dostupnim analitičkim rješenjima. Rezultate prikazati u obliku dijagrama. Potrebno je nacrtati sklop elektromotor – kompresor – temeljna ploča – elastični elementi – prigušni elementi – podloga.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

..... 24.06.2016. ....

..... 30.09.2016. ....

..... 10.10.2016. ....

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
1. Kompresori .....	1
1.1. Općenito o kompresorima .....	1
1.2. Upotreba i podjela kompresora .....	1
1.3. Princip rada klipnog kompresora .....	6
1.4. Dijelovi kompresora.....	7
1.4.1. Cilindri i kućište klipnih kompresora .....	7
1.4.2. Cilindarska glava .....	8
1.4.3. Samoradni ventili .....	8
1.4.4. Koljenasto vratilo, klip, klipnjača i klizni prstenovi .....	8
2. Klip .....	11
2.1. Dijelovi klipa.....	11
2.2. Materijali za izradu klipa .....	12
3. Elementi klipnog mehanizma .....	13
3.1. Vrste Gibanja .....	14
3.2. Geometrijske veličine cilindra .....	15
3.2.1. Radni proces.....	16
4. Kinematika klipnog mehanizma .....	17
4.1. Put klipa .....	17
4.2. Brzina klipa .....	21
4.3. Ubrzanje klipa .....	23
4.4. Brixova točka .....	25
4.5. Gibanje klipnjače .....	26
5. Sile u klipnom mehanizmu, moment i snaga kompresora .....	27
5.1. Redukcija mase klipnjače.....	30
5.2. Sile inercije oscilirajućih masa .....	33
5.3. Rezultirajuća sila na klip F.....	34
5.4. Sila na klipnjaču:.....	35
5.5. Normalna sila na bok cilindra: .....	35
5.6. Tangencijalna sila: .....	35
5.7. Radijalna sila:.....	35
6. Metoda izračuna vibracijskog odziva kompresora .....	36
6.1. Jednadžbe gibanja .....	36
6.2. Metoda pretpostavljenog rješenja .....	37
6.2.1. Rješavanje vibracijskog sustava s jednim stupnjem slobode.....	37
6.2.2. Rješavanje vibracijskog sustava s tri stupnja slobode gibanja.....	40

6.2.3. Matematički model vibracijskog odziva .....	43
6.3. Konačno rješenje vibracijskog odziva klipnog kompresora .....	46
7. ZAKLJUČAK.....	48
LITERATURA.....	49

## POPIS SLIKA

Slika 1. Podjela kompresora prema načinu rada .....	4
Slika 2. Područje rada pojedinih tipova kompresora.....	4
Slika 3. Prikaz idealnog procesa dvostupanjskog kompresora s među-hladnjakom.....	5
Slika 4. Princip rada klipnog kompresora .....	6
Slika 5. Dijelovi klipnog kompresora lit. [xy] .....	10
Slika 6. Sklop klip-klipnjača .....	11
Slika 7. Vrste gibanja elemenata klipnog kompresora .....	14
Slika 8. Radni i kompresijski volumen cilindra .....	15
Slika 9. Shema geometrije klipnog mehanizma .....	17
Slika 10. Put klipa u ovisnosti o zakretu KV za različite vrijednosti $\lambda$ .....	19
Slika 11. Crveno: put klipa; Plavo: prvi harmonik; Zeleno: drugi harmonik .....	20
Slika 12. Brzina klipa u ovisnosti o zakretu KV za različite vrijednosti $\lambda$ .....	21
Slika 13. Crveno: brzina klipa; Plavo: prvi harmonik; Zeleno: drugi harmonik.....	22
Slika 14. Ubrzanje klipa u ovisnosti o zakretu KV za različite vrijednosti $\lambda$ .....	23
Slika 15. Crveno: ubrzanje klipa, odnosno oscilirajućih masa <i>mosc</i> .....	24
Slika 16. Grafičko određivanje položaja BRIX-ove točke.....	25
Slika 17. Shematski prikaz klipnog mehanizma .....	27
Slika 18. Sila plinova, $F_{pl}$ .....	28
Slika 19. Sila na klip i koljenasto vratilo .....	29
Slika 20. Redukcija mase klipnjače i određivanje moment oko težišta T.....	30
Slika 21. Oscilirajuće i rotirajuće mase klipnog mehanizma .....	32
Slika 22. Sile inercije oscilirajućih masa .....	33
Slika 23. Rezultirajuća sila na klip.....	34
Slika 24. Jednostavan elastično–inercijski sustav .....	37
Slika 25. Graf vibracijskog odziva sustava s 1 stupnjom slobode gibanja .....	39
Slika 26. Prikaz u koordinatnom sustavu .....	40
Slika 27. Rješenje domene po dijelovima vremenske domene .....	41
Slika 28. Prikaz vremenskog elementa .....	42
Slika 29. Graf s i-tim elementom .....	42
Slika 30. Skica klipnog kompresora u koordinatnom sustavu .....	43
Slika 31. Zapis u matričnom obliku .....	44
Slika 32. Vibracijski odziv kompresora s bocom.....	46
Slika 33. Sila prenesena na okolinu .....	47

## POPIS OZNAKA

$D$	$m$	promjer cilindra
$r$	$m$	polumjer osnovnog koljena koljenastog vratila
$V_H$	$m^3$	radni volumen cilindra
$V_{min}$	$m^3$	najmanji volumen cilindra
$V_{max}$	$m^3$	najveći volumen cilindra
$\varepsilon$		kompresijski omjer
$r$	$m$	polumjer osnovnog koljena koljenastog vratila
$H$	$m$	hod cilindra
$A$	$m^2$	površina poprečnog presjeka cilindra
$a$	$m/s^2$	ubrzanje klipa
$h$	$m$	pomak klipa
$x_{max}$	$m$	konačna duljina klipnjače
$l$	$m$	duljina klipnjače
$v$	$m/s$	brzina klipa
$\omega$	$rad/s$	kutna brzina
$\omega_{klipnj}$	$rad/s$	kutna brzina njihanja klipnjače
$\omega_{lež klippnj}$	$rad/s$	kutna brzina ležaja klipnjače
$n$	$o/min$	brzina vrtnje
$p_{kuć}$	$P_a$	tlak u kućištu vratila
$p_{cil}$	$P_a$	tlak plinova u cilindru
$n$	$o/min$	brzina vrtnje
$F$	$N$	rezultirajuća sila na klip
$F_t$	$N$	tangencijalna sila
$F_r$	$N$	radijalna sila
$F_{in}$	$N$	sila inercije
$m$	$kg$	masa
$F_{klipnj}$	$N$	sila na klipnjaču
$J$	$kgm^2$	moment inercije
$\rho$	$kg/m^3$	gustoća
$r_j$	$m$	polumjer inercije mase klipnjače
$p$	$P_a$	tlak
$\lambda$		omjer klipnjače
$\alpha$		kut zakreta koljenastog vratila
$\beta$		kut odklona klipnjače od uzdužne osi cilindra
$F_{pl}$	$N$	sila plinova
$F_n$	$N$	normalna sila na bok cilindra



## SAŽETAK

Zadatak rada je bio optimirati aktivnu izolaciju kompresora s bocom uz pomoć numeričke metode pretpostavljenog rješenja. Sustav jednadžbi riješen je u programskom paketu Microsoft Office Excel. Za zadane podatke kompresora, proračunato je 5 kombinacija karakteristika elastičnih i prigušnih elemenata između sklopa kompresor-boca i temelja. Za kombinaciju tih karakteristika koja daje najmanju silu prenesenu u prijelaznom razdoblju i u ustaljenom radu je prikazana u dijagramima. Najprije je bilo potrebno podijeliti masu klipnjače na tri reducirane mase (mala glava, velika glava i struk) te izračunati moment inercije mase u točki T. Dobiveni iznosi proračuna klipnjače ubačeni su u Microsoft Office Excel gdje je izračunata kinematika klipnog mehanizma kompresora. U kinematici dobivamo približan i točan iznos za pomak klipa, brzinu klipa te njegovo ubrzanje. Na temelju dobivenih podataka nastaju potrebni dijagrami istih. Nakon kinematike se računa dinamika klipnog mehanizma, određene podatke dobivamo kao zadane a neke uzimamo iz prethodno dobivenih rezultata. Proračunom u dinamici dobivamo sile inercije koje djeluju na cijelu konstrukciju klipnog kompresora. U posljednjem djelu proračuna, traži se vibracijski odziv kompresora. U proračunu vibracijskog odziva kompresora s 3 stupnja slobode gibanja je trebalo namjestiti početne uvjete kako bi se dobila cikličnost. Za raspisivanje jednadžbi gibanja koristili smo matricu kao model računanja gdje smo imali poznate veličine za 3 stupnja slobode gibanja. Rezultat koji smo dobili pokazuje da kompresor s 3 stupnja slobode gibanja ima različite vibracije u različitim vremenskim intervalima i da su različiti iznosi pomaka za sva 3 stupnja gibanja pri vibracijama. Najveći pomak uzrokovan vibracijama javlja se u vertikalnom djelu, a najmanji u horizontalnom djelu.

## 1. Kompresori

### 1.1. Općenito o kompresorima

Kompresor je stroj ili uređaj za stlačivanje (kompresija) plina ili pare. Omjer početnog i konačnoga tlaka u kompresoru naziva se omjerom ili stupnjem kompresije. Katkad se kompresorima nazivaju samo strojevi i uređaji koji ostvaruju omjer kompresije veći od 1 : 3, dok se oni s omjerom kompresije manjim od toga nazivaju puhalima, a oni s manjim od 1 : 1,1 ventilatorima. Kompresor zraka je pneumatski stroj koji služi za pretvorbu mehaničke energije u energiju stlačenog zraka, dok se u pneumatskim motorima obavlja pretvorba energije u suprotnom smjeru. Kompresori zraka i pneumatski motori se bitno ne razlikuju, a konstrukcijski se razlikuju samo u detaljima. Često isti stroj može raditi kao kompresor ili motor, zavisno od ugradnje odnosno povezivanja u sustav. Kompresori komprimiraju zrak ili plinove od nižeg tlaka na viši tlak. Komprimiranjem zraka ili plina stvara se toplina, temperatura se povisuje, što znači da se upotrijebljena mehanička energija (pogonskog stroja) troši na komprimiranje i drugim dijelom na povećanje topline temperature (unutarnje energije) komprimiranog zraka ili plina. Zagrijavanje plina, a time i samog kompresora je štetno, jer je potrošnja mehaničke energije mnogo veća nego bi inače bila. Naime, zagrijavanjem, plin se nastoji širiti, pa je njegova ekspanzija veća. Zbog toga je potrebno utrošiti više pogonske energije za njegovo sabijanje nego kada bi mu temperatura ostala nepromijenjena. Osim toga, smanjuje se dobava, tj. količina plina koju kompresor daje, a uz to je i mnogo teže podmazivanje kompresora, pa je njegovo hlađenje neophodno.

### 1.2. Upotreba i podjela kompresora

Kompresori imaju veliku primjenu u industriji, rudarstvu, građevinarstvu, metalurgiji procesnoj industriji ( pivovara (  $\text{CO}_2$  ), rafinerije ), rashladnoj tehnici ( frižideri, klimatizeri hladnjače ), itd.

Kompresori se primjenjuju:

- za pogon pneumatskih alata i strojeva,
- za postizanje niskih temperatura u postrojenjima za hlađenje, tj. u rashladnoj tehnici, za komprimiranje amonijaka, ugljične kiseline i drugih plinova,
- u kemijskoj industriji za razne tehnološke procese,
- za raspršivanje boje i lakova pri bojanju,
- za ubrzavanje procesa sagorijevanja (visoke peći, konventore i motore),
- u elektrotehnici za isključivanje i uključivanje sklopki,
- za komprimiranje plina u čelične boce.

Kompresori se dijele: prema konstrukciji, komprimiranom tlaku, načinu rada i hlađenju

- Prema konstrukciji: klipni kompresori, turbokompresori, rotacioni kompresori
- Prema komprimiranom tlaku:
  - kompresore niskog tlaka — niskotlačne do 7 [bar]
  - kompresore srednjeg tlaka — srednjotlačne od 7 do 20 [ bar]
  - kompresore visokog tlaka — visokotlačne preko 20 [ bar]
- Prema načinu rada:
  - jednoradni kompresori, dvoradni, jednostupanjski i višestupanjski kompresori
- Prema hlađenju: kompresori hlađeni vodom i hlađeni zrakom.

Osnovna podjela kompresora je podjela na volumetričke kompresore i turbokompresore. U pneumatici se primjerice gotovo isključivo koriste volumetrički kompresori. Njihov princip rada bazira se na radnoj komori promjenljivog obujma ( npr. cilindar s klipom ). Smanjenjem obujme radne komore smanjuje se i volumen zraka u njoj, što uzrokuje odgovarajući pritisak tlaka zraka.

Podjela volumetričkih kompresora:

- Klipni kompresori:

mehanizam: koljeničasti / radijalni / aksijalni / kulisni

jednostupanjski / višestupanjski

jednoradni / dvoradni

vertikalni / horizontalni

mobilni / stacionarni – za veće kompresore

- Rotacijski kompresori:

rotacijski kompresori s jednim rotorom:

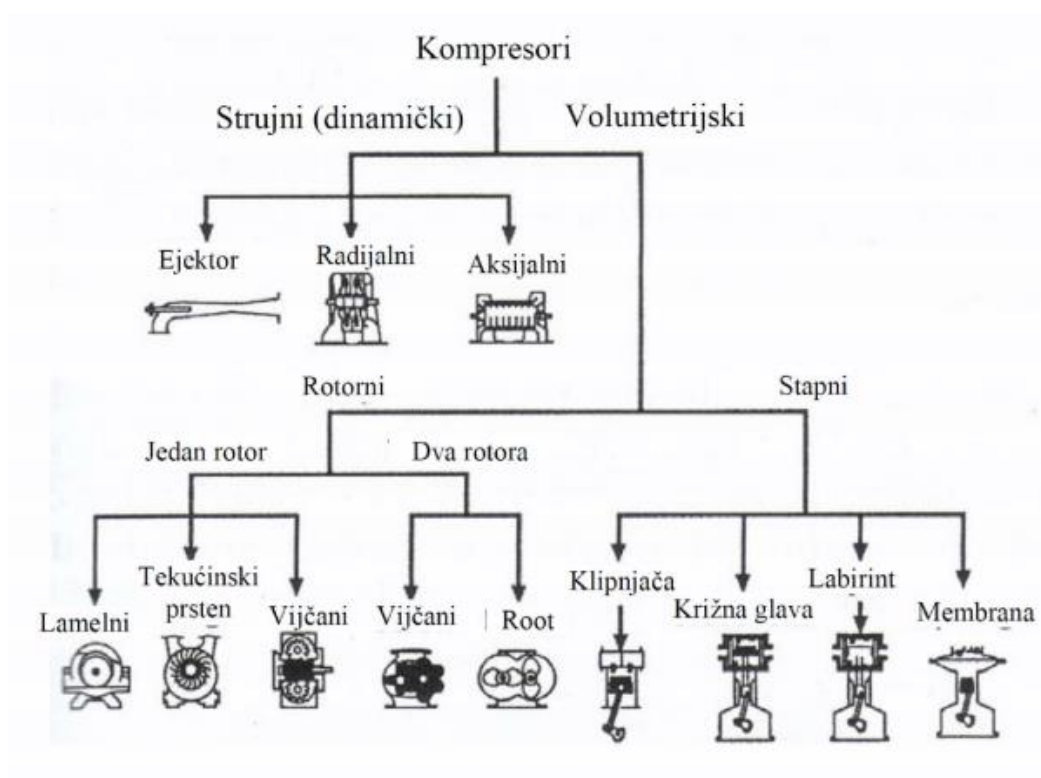
- krilni (lamelni),
- s tekućinskim prstenom,
- vijčani

rotacijski kompresori s dva ili tri rotora

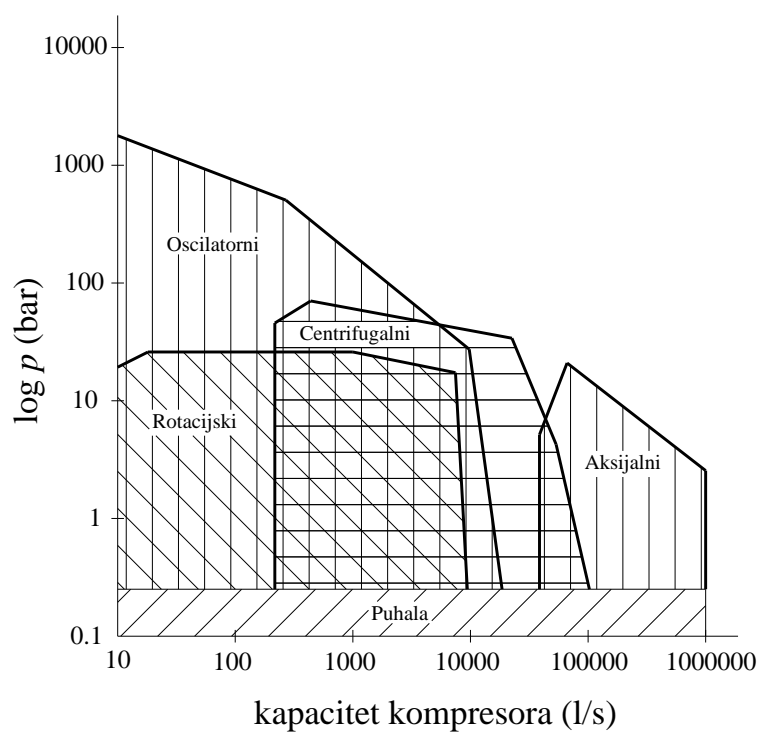
- vijčani,
- Root

- Membranski kompresori

Turbokompresori spadaju u strojeve na strujanje. Osnovni sklop turbokompresora čini kolo rotora koje se razmjerno velikom brzinom vrti na vratilu na koje je nasaden i pripadni stator koji miruje. Turbokompresori se dijele na radijalne ( centrifugalne ) i aksijalne turbokompresore. Općenito radijalni turbokompresori postižu veći tlak i manji protok nego aksijalni.



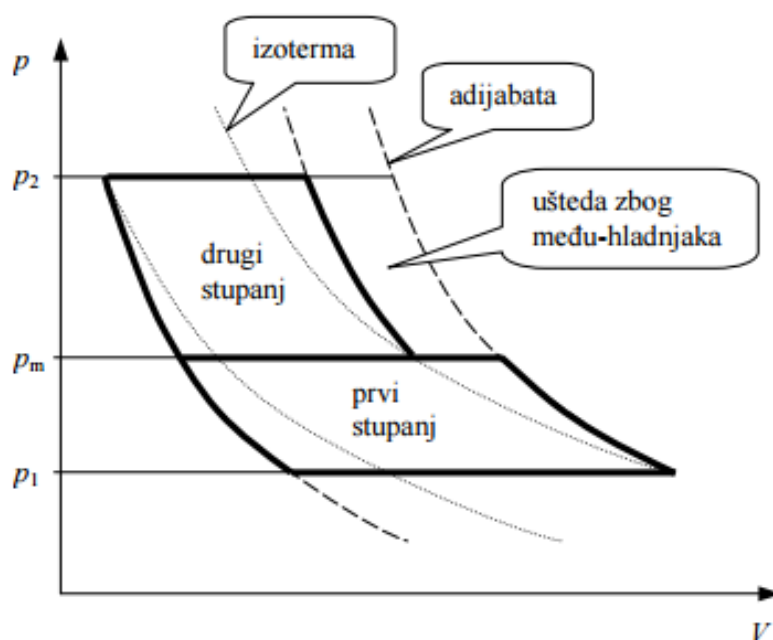
Slika 1. Podjela kompresora prema načinu rada



Slika 2. Područje rada pojedinih tipova kompresora

Sa slike 2. koja prikazuje karakteristike tipičnih današnjih kompresora, možemo zaključiti sljedeće:

Visoki i najviši tlakovi postižu se klipnim kompresorima (višestupanjska kompresija). Međutim, dobava klipnih kompresora je manja od rotacijskih kompresora. Veće dobave postižu se rotacijskim vijčanim kompresorima a najveće primjenom turbokompresora. Turbokompresori se najčešće koriste za niske i srednje konačne tlakove. Međutim, budući da je kod turbokompresora uobičajena višestupanjska kompresija, i kod njih se mogu postići visoki konačni tlakovi, čak od više stotina bara.



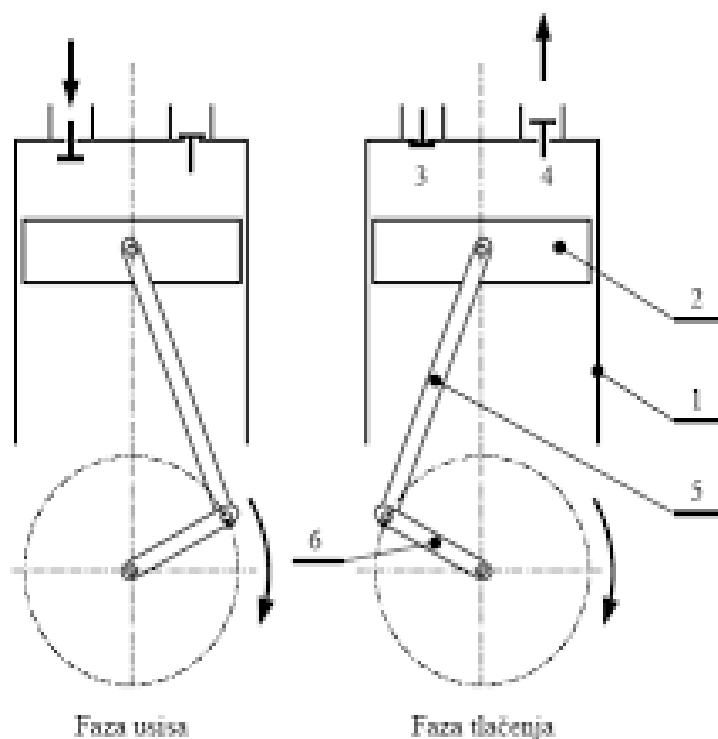
**Slika 3. Prikaz idealnog procesa dvostupanjskog kompresora s međuhladnjakom u p-V dijagramu**

Sl. 3 prikazuje kružni proces idealnog dvostupanjskog kompresora s međuhladnjakom u p-V dijagramu. Rad jednog ciklusa ( usisavanje i tlačenje ) za prvi stupanj jednak je površini donjeg kružnog procesa. Promjena stanja zraka u kompresorskom stupnju obično je bliska adijabatskoj. Rad potreban za adijabatsku kompresiju veći je od rada izotermne kompresije. Ugradnjom međuhladnjaka između stupnjeva kompresora smanjuje se ukupni potrebni rad kompresora (ukupni proces približava se izotermnom ). Povoljno je i smanjenje temperature na izlazu kompresora ( izlazu drugog stupnja ).

### 1.3. Princip rada klipnog kompresora

Cilindar jednoradnog klipnog kompresora puni se i prazni samo s jedne strane klipa. Pri hodu klipa prema dolje ( Sl. 4 ) cilindar se puni kroz usisni ventil ( faza usisa ), dok se pri kretanju u suprotnom smjeru zrak tlači kroz tlačni ventil ( faza tlačenja ).

Na slici je prikazan kompresor kod kojeg se pretvaranje pravocrtnog gibanja klipa pretvara u kružno gibanje pomoću mehanizma s koljениčastim vratilom. Dvoradni cilindri usisavaju i tlače zrak s obje strane klipa.



Slika 4. Princip rada klipnog kompresora

Dijelovi klipnog kompresora:

- 1 – cilindar
- 2 – klip
- 3 – usisni venti
- 4 – tlačni ventil
- 5 – ojnica
- 6 – koljениčasto vratilo

U višestupanjskim kompresorima zrak se uzastopno tlači u većem broju cilindara kroz koje prolazi ( serijski spoj ). Jednostupanjski kompresori koriste se za povećanje tlaka do 4 bar, dvostupanjski do 15 bar a više stupanjski za veće tlakove. Zbog mogućnosti zapaljenja kompresorskog ulja, izlazna temperatura zraka ne smije prelaziti 200 °C.

## **1.4. Dijelovi kompresora**

### **1.4.1. Cilindri i kućište klipnih kompresora**

Za manje kompresore cilindri se buše direktno u tijelu kompresora, dok se kod većih kompresora rade zamjenjive cilindarske košuljice. U svakom slučaju cilindri moraju biti vrlo precizno i fino obrađeni, te moraju imati odgovarajuću površinsku tvrdoću i otpornost na habanje. Materijali od kojih se izrađuju cilindri ovise o tlaku, promjeru cilindra i vrsti zraka koji se komprimira. Za kompresore niskog i srednjeg tlaka izrađuju se od lijevanog željeza, nodularnog lijeva ili čeličnog lijeva, ovisno o primjeni. Cilindri od srednjeg do visokog tlaka imaju manje promjere i deblje stjenke. Uobičajeno se koristi nodularni lijev. Cilindri visokog tlaka do 500 bar izrađuju se od kovanog čelika. Otvori za ventile su završno obrađene do visokog poliranja. Košuljice cilindra se uglavnom ne koriste kod niskotlačnih i srednjetačnih cilindara kod kompresije nekorozivnih plinova kao što je zrak a gotovo se uvijek koriste u srednjetačnim i visokotlačnim cilindrima, gdje se komprimira korozivan plin. Međutim, neki proizvođači bez obzira na to uvijek ugrađuju košuljice. Iako ugradnja košuljica cilindra povećava cijenu kompresora, u slučaju zamjene, znatno su povoljnije nego zamjena kompletnog cilindra. Za izradu košuljica do tlaka od 200 bar za podmazivane kompresore općenito se koristi centrifugalno lijevano željezo. Za više tlakove koristi se otvrdnuti čelični lijev. Za najviše tlakove koristi se kovani čelik s nitriranom površinom. Kućište kompresora nosi cilindre, a u njemu su i ležajevi za koljenasto vratilo. Također, kućište nosi i druge dijelove kompresora, kao što su uljna pumpa i filter ulja. Izrađuje se od kvalitetnog lijevanog željeza ili zavarene čelične konstrukcije.



### **1.4.2. Cilindarska glava**

Iznad ventilske ploče i cilindra nalazi se glava cilindra, koja se s više vijaka pričvrsti za cilindar, odnosno kućište kompresora. Glava cilindra uglavnom služi za razvod plina koji se usisava i plina koji se istiskuje. Unutar glave cilindra obično se nalazi i jedna jaka opruga koja pritišće ventilsku ploču. U slučaju da u cilindar prodre veća količina tekućeg rashladnog fluida (kod rashladnih kompresora), lako može doći do tzv. „hidrauličkog udara“ s velikim mehaničkim oštećenjima cilindra, klipa, klipnjače i drugih dijelova kompresora. Spomenuta opruga služi za sigurnost, jer se ona stisne, ventilska ploča se podigne i tekućina prijeđe na potisnu stranu.

### **1.4.3. Samoradni ventili**

Cilindri se zatvaraju poklopcem na kome su obično usisni i potisni ventili te se taj poklopac zove i ventilska ploča. Ventilska ploča je obična, ravna ploča precizno obrađena i izbušena s nizom otvora za usis i potis. Zadaća ventila je da omoguće jednosmjerno strujanje plina ili para u ili van cilindra. Na svakoj ventilskoj ploči moraju biti jedan ili više ventila za usis i za potis. Ventili na ventilskoj ploči mogu imati različita rješenja i oblike, ali su najčešći u obliku elastičnih pera i koncentričnih prstenova.

### **1.4.4. Koljenasto vratilo, klip, klipnjača i klizni prstenovi**

Koljenasto vratilo prenosi ulazni rad preuzet od pogonskog stroja i predaje ga preko klipnjače i klipa radnom plinu. Koljenasto vratilo izrađuje se od kovanog ugljičnog čelika ili od nodularnog lijeva. Ne koristi se toplinska obrada kaljenjem radi otvrđivanja površine. Većina kovanih koljenastih vratila u skladu su s AISI 1020, ASTM 668 za manje promjere i AISI 1045, ASTM 668 klasa F za veće promjere. Koljenasta vratila iz nodularnog lijeva u skladu su s ASTM A-536 Grade 80-55-06. Statički se balansiraju za manje brzine vrtnje, a preko 900 o/min dinamički se balansiraju. Glavni ležajevi su od bijele kovine u čeličnoj blazinici uprešanoj u poklopcu od lijevanog željeza.

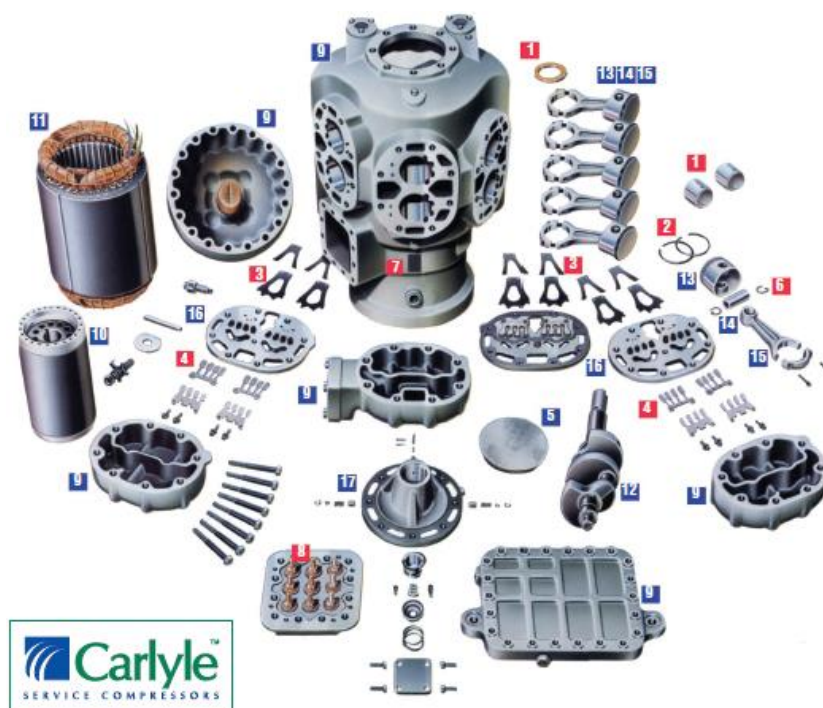
Izvedba klipa ovisi o tipu i namjeni kompresora. Kod konstruiranja se vodi računa o promjeru cilindra, potisnom tlaku, brzini vrtnje koljenastog vratila, dužini stapaja i zahtijevanoj težini klipa. Može biti iz punog komada ili sa šupljinom prema kućištu. Ako je sa šupljinom, uobičajeno je s unutrašnje strane orebren, radi ojačanja kako bi se spriječile deformacije, a klip ostao što lakši. Kod bezuljnih konstrukcija moguće su izvedbe sa utorima na stjenkama klipa ili na košuljicama cilindra čime se postiže labirintno brtvljenje. Postoje tri osnovna tipa:

- Klip iz jednog komada, izrađuje se od punog lijevanog željeza ili čelika za male promjere visoke razlike tlakova. Za velike promjere i niske tlakove izrađuju se od šupljeg lijevanog željeza ili aluminijskih legura.
- Klip iz dva komada izrađuje se od aluminija, čelika ili lijevanog željeza. Moguća je kombinacija materijala. Ovakva konstrukcija omogućuje ugradnju širokog rider prstena od teflona ili olovne bronce. Aluminij smanjuje težinu klipa, pa time i sile inercije. Općenito se koristi za promjere iznad 25 cm.
- Klip iz tri komada se koristi kada se dodatni rider prsten želi direktno umetnuti u utor u klip. Na taj način moguće je umetnuti deblji rider prsten, budući da se on ne navlači preko klipa. Također, kod aluminijskih klipova velikih promjera, metalni prsteni bi mogli oštetiti površinu klipa pri navlačenju.

Klipni ili stapni prstenovi se dijele na kompresijske, uljne i rider prstenove.

- Kompresijski prsteni su uvijek prisutni, a dali će biti ugrađeni uljni prsteni ili rider prsteni ovisi o tipu kompresora i namjeni. Standardni kompresijski prstenovi su elastični, od sivog lijeva, razrezani na jednom mjestu. U slobodnom stanju veći su od provrta cilindra. Broj kompresijskih prstenova ovisi o razlici tlakova iznad i ispod klipa.
- Uljni prstenovi se koriste kod uljem podmazivanih kompresora i imaju zadaću da razmazuju ulje, a kod kretanja klipa prema dolje stružu ulje sa košuljice i vraćaju ga u kućište. Uljni prsteni mogu biti iznad ili ispod osovinice klipa.

- Rider prstenovi su dio konstrukcije svih klipova gdje nema podmazivanja ili gdje postoji opasnost od prestanka podmazivanja tijekom rada kompresora. Novi procesni kompresori imaju rider prstenove bez obzira na podmazivanje. Rider prsteni sprječavaju direktan kontakt /trenje između klipa i košuljice cilindra. Izrađuju se od olovne bronce ili teflona. Klipnjače se izrađuju kovanjem od niskougljičnog čelika, poprječnog presjeka dvostrukog T profila. Omjer radijusa koljenastog vratila i dužine klipnjače uobičajeno iznosi od 1/4 do 1/5.



Slika 5. Dijelovi klipnog kompresora lit. [xy]

- |                      |                          |
|----------------------|--------------------------|
| 1 ležajevi           | 10 rotor elektro motora  |
| 2 klipni prstenovi   | 11 stator elektro motora |
| 3 usisni ventili     | 12 koljenasto vratilo    |
| 4 potisni ventili    | 13 klipovi               |
| 5 ploča              | 14 osovina klipa         |
| 6 sigurnosni prsten  | 15 klipnjača             |
| 7 ploča s natpisom   | 16 ventilske ploče       |
| 8 električni spojevi | 17 ležaj pumpe ulja      |
| 9 komponente kućišta |                          |

## 2. Klip

### 2.1. Dijelovi klipa

Općenito govoreći, klip se dijeli na dva dijela, na krunu klipa i na plašt klipa. Kruna klipa je termički najopterećeniji dio klipa i radi se od materijala koji može izdržati termička opterećenja kojima će biti podvrgnut. Na kruni klipa su utori za klizne prstenove koji zajedno s klipom odjeljuju prostor poviše od prostora ispod klipa. Iako se smatra da klip ima oblik valjka, to u stvarnosti nije tako, posebno kod aluminijskih klipova, jer je gornji dio krune nešto manjeg promjera zbog nejednakih termičkih naprezanja i nejednakog širenja materijala.



Slika 6. Sklop klip-klipnjača

## 2.2. Materijali za izradu klipa

Materijali za izradu klipa su aluminij i čelik. Zbog većeg širenja uslijed temperature, aluminijски klipovi se upotrebljavaju samo do veličina promjera od 200-250 mm. Iznad tih veličina svi klipovi su čelični.

Najčešće se izrađuju klipovi od legure aluminija. To su u prvom redu legure:

- Al Si 25 Cu Ni
- Al Si 21 Cu Ni
- Al Si 18 Cu Ni
- Al Si 12 Cu Ni

Materijali za klipove moraju imati:

- malu specifičnu težinu
- visoku čvrstoću
- dobru toplinsku vodljivost
- mali koeficijent toplinskog širenja
- mali koeficijent trenja
- veliku otpornost protiv trošenja

### 3. Elementi klipnog mehanizma

Klipni mehanizam sastavni je dio motora odnosno kompresora. Njegova svrha je što učinkovitije pretvaranje pravocrtnog gibanja klipa u rotacijsko gibanje koljenastog vratila koje obavlja koristan rad. Takvo uzastopno gibanje rezultat je precizno podešenog termodinamičkog procesa u cilindru kompresora. Radi daljnjeg razmatranja i pojašnjenja kinematike klipnog mehanizma, potrebno je poznavanje osnovnih dijelova od kojih se sastoji klipni mehanizam. Sastavni elementi klipnog mehanizma su:

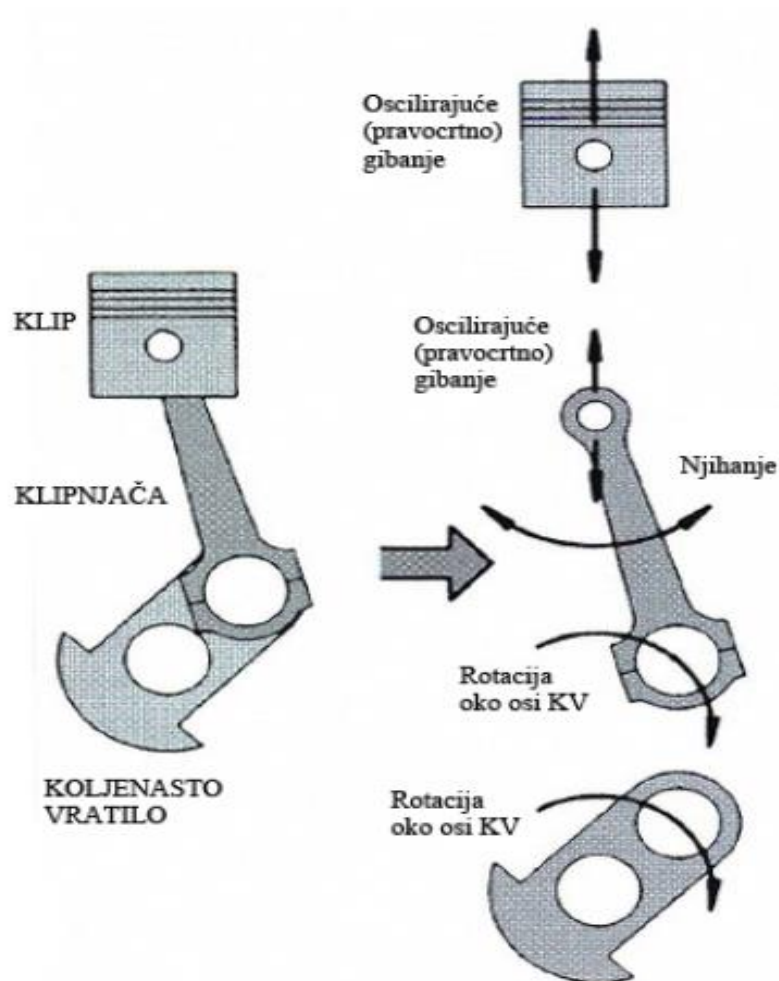
- klip ( osovinica klipa, klipni prstenovi )
- klipnjača
- koljenasto vratilo

**Osovinica** (naziva se još i bolcen u žargonu) je osovina na koju se spaja klipnjača. Umetnuta je u klip, i osigurana da se ne može micati najčešće prstenovima za osiguranje (u žargonu Seger-prstenovima). Kada služi kao spoj na klipnjaču ( što je gotovo uvijek), tada je ona osnak gornjeg ležaja klipnjače.

**Klipnjača** spaja klip (ili križnu glavu) s koljeničastom osovinom, služi kao spona između pravocrtnog gibanja klipa (klipnjače) i rotacionog gibanja koljeničaste osovine.

**Koljenasto vratilo** je dio klipnog mehanizma na čijem se kraju nalazi izlaz iz klipnog mehanizma i osovina za spoj na potrošače ili na spoj na elektromotor.

### 3.1. Vrste Gibanja

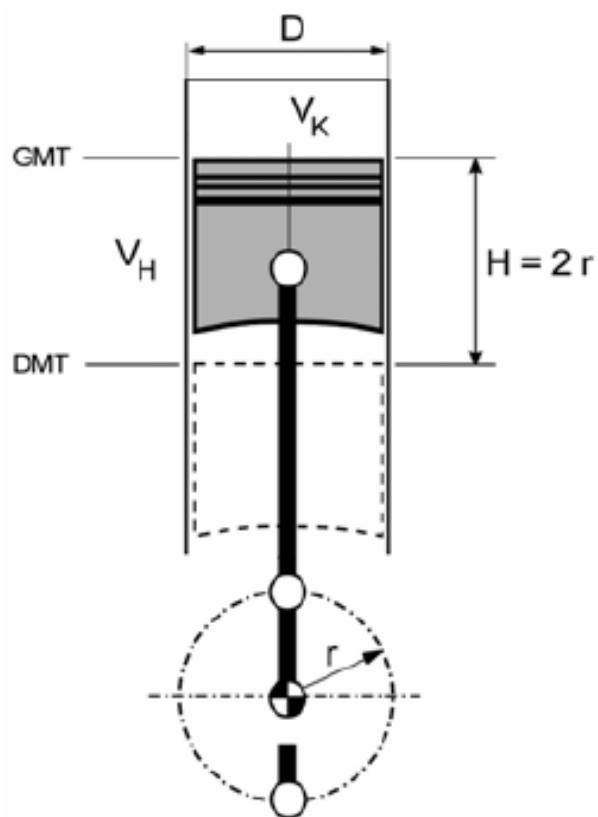


Slika 7. Vrste gibanja elemenata klipnog kompresora

Prema slici 7:

- klip oscilira ( pravocrtno ) od GMT do DMT
- koljenasto vratilo rotira oko svoje osi
- dio klipnjače vezan za klip preko osovinice oscilira ( pravocrtno ) zajedno sa klipom
- dio klipnjače vezan za leteći rukavac koljena rotira oko osi koljenastog vratila zajedno sa koljenastim vratilom
- rezultirajuće gibanje može se opisati kao njihanje – ravinsko gibanje ( rot. + tran. )

### 3.2. Geometrijske veličine cilindra



Slika 8. Radni i kompresijski volumen cilindra

$D$ - promjer cilindra

$H$ - hod cilindra

$r$  – polumjer osnovnog koljena koljenastog vratila



- Radni volumen cilindra:  $V_H = \frac{D^2\pi}{4}H = V_{max} - V_{min}$  ( 1.1 )

- Najmanji volumen cilindra:  $V_{min} = V_k$  ( kompresijski volumen ) ( 1.2 )

- Najveći volumen cilindra:  $V_{max} = V_H + V_K = V_H \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}$  ( 1.3 )

- Kompresijski omjer:  $\varepsilon = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_H+V_K}{V_K}$  ( 1.4 )

### 3.2.1. Radni proces

Radni proces svih klipnih motora, pa i onih rotacijskih poput WANKEL-ova, ima četiri uvijek ista dijela koji slijede jedan iza drugoga. To su:

1. USIS svježe radne tvari
2. KOMPRESIJA radne tvari
3. izgaranje i EKSPANZIJA
4. ISPUH tj. izbacivanje istrošene radne tvari

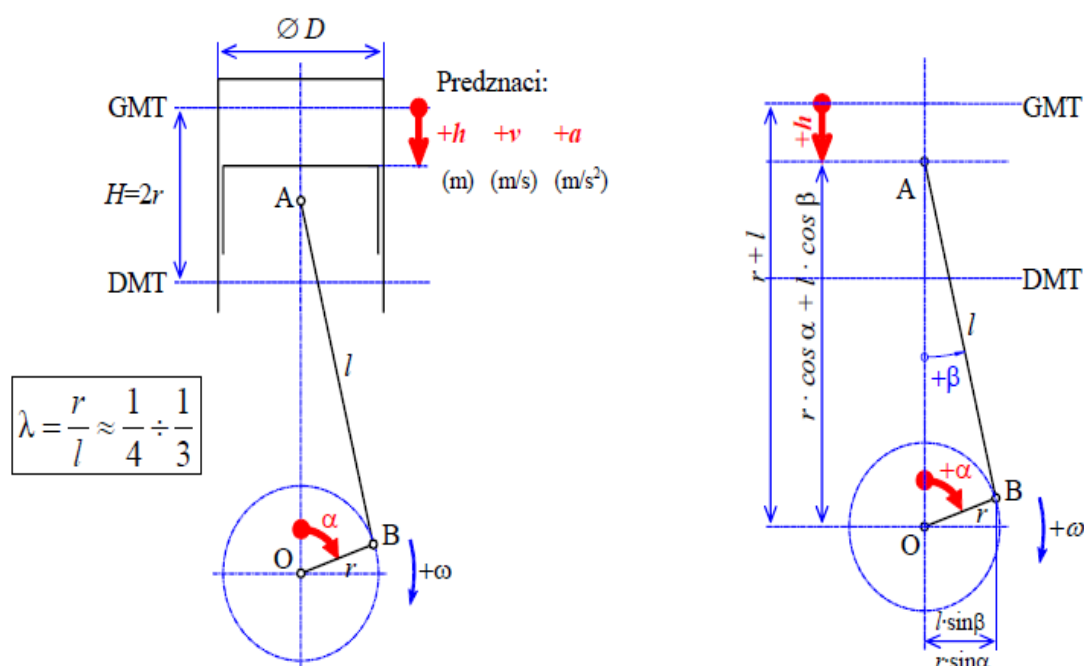
Ukupno trajanje procesa izražava se pomoću zakreta glavnog vratila motora tj. koljenastog vratila ili radilice. Trajanje procesa iznosi:

- 2 okretaja koljenastog vratila ( kod četverotaktnih motora )
- 1 okretaj koljenastog vratila ( kod dvotaktnih motora i kompresora )

Takt je definiran kao jedno kretanje klipa od jednog do drugog krajnjeg položaja, odnosno od gornje mrtve točke (GMT) do donje mrtve točke (DMT) ili obratno, što odgovara zakretu koljenastog vratila od 180°.

## 4. Kinematika klipnog mehanizma

Kao što je već spomenuto, klip se giba pravocrtno od GMT do DMT i natrag. To pravocrtno gibanje ovisi o kružnom gibanju koljenastog vratila, te se može definirati na taj način da svaki kut zakreta koljenastog vratila odgovara jednom položaju klipa. Kako se ovdje radi o pretvorbi jedne vrste gibanja drugi, klip ne putuje jednakom brzinom već usporava kada se približava krajnjim točkama GMT i DMT, te isto tako ubrzava kada se udaljuje od njih.



Slika 9. Shema geometrije klipnog mehanizma

### 4.1. Put klipa

Pomak klipa  $h$ , u ovisnosti o zakretu koljenastog vratila može se odrediti prema geometriji prikazanoj na slici 9:

$$h = r + l - (r \cdot \cos \alpha + l \cdot \cos \beta) = r \cdot (1 - \cos \alpha) + l \cdot (1 - \cos \beta)$$

$$l = \cos^2 \beta + \sin^2 \beta \quad \longrightarrow \quad \cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta}$$

$$h = r \cdot \left[ (1 - \cos \alpha) + \frac{l}{r} (1 - \sqrt{1 - \sin^2 \beta}) \right] \quad (2.1)$$

Uvođenjem omjera duljine KV  $r$  i duljine klipnjače  $l$  kao geometrijske karakteristike  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{r}{l} \quad (2.2)$$

Te zatim iz izraza za visinu trokuta OAB:

$$\begin{aligned} r \cdot \sin \alpha &= l \cdot \sin \beta \quad \rightarrow \quad \sin \beta = \frac{r}{l} \cdot \sin \alpha \\ \sin \beta &= \lambda \cdot \sin \alpha \end{aligned} \quad (2.3)$$

Uvrštavanjem (2.3) u (2.1) slijedi:

$$h = r \cdot \left[ (1 - \cos \alpha) + \frac{1}{\lambda} \cdot (1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \alpha}) \right] \quad (2.4)$$

MacLaurinov red vrijedi u okolici nule, ( to se vidi iz izraza za red ), međutim svaki novi položaj mehanizma može se proglasiti početnim tj. nultim. Razvojem korijena  $\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \alpha} = \sqrt{1 - z} = f(z)$  iz jednadžbe (2.4) u MacLaurinov red, dobiva se:

$$\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \alpha} = \sqrt{1 - z} = f(z) \quad \rightarrow \quad f(z) = f(0) + \frac{z}{1!} f'(0) + \frac{z^2}{2!} f''(0) + \dots$$

slijedi:

$$\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \alpha} = 1 - \frac{1}{2} \lambda^2 \cdot \sin^2 \alpha - \frac{1}{2 \cdot 4} \lambda^4 \cdot \sin^4 \alpha - \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4 \cdot 6} \lambda^6 \cdot \sin^6 \alpha - \dots$$

Kada se gornji izraz uredi pomoću transformacijskih izraza za trigonometrijske funkcije, dobiva se oblik:

$$h(\alpha) = r \cdot (A_0 - A_1 \cdot \cos \alpha - \frac{A_2}{4} \cdot \cos 2\alpha - \frac{A_4}{16} \cdot \cos 6\alpha - \dots) \quad (2.5)$$

- gdje su faktori  $A_0, A_1, A_2, A_4, \dots$  jednaki:

$$A_0 = 1 + \frac{1}{4} \lambda + \frac{3}{64} \lambda^3 + \frac{5}{256} \lambda^5 + \dots \quad A_0 \approx 1 + \frac{\lambda}{4}$$

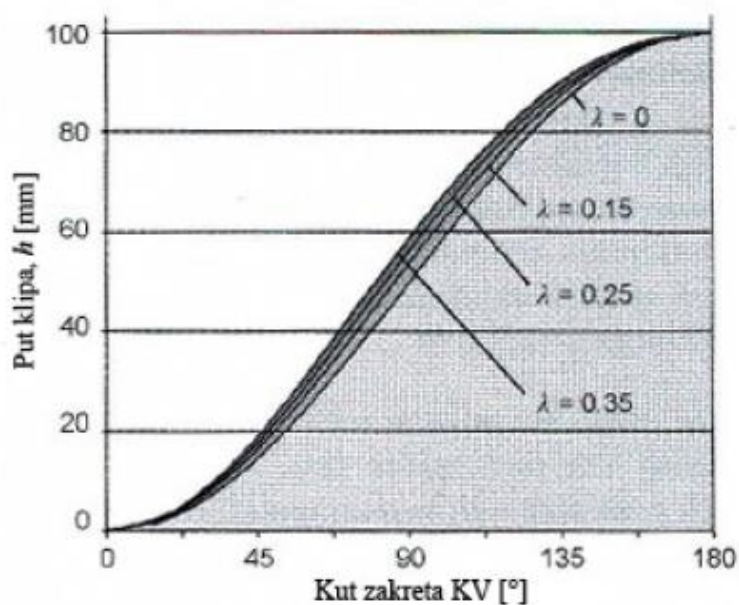
$$A_1 = 1$$

$$A_2 = \lambda + \frac{1}{4} \lambda^3 + \frac{15}{128} \lambda^5 + \dots \quad A_2 \approx \lambda$$

$$\begin{aligned}
 A_4 &= -\frac{1}{4} \lambda^3 - \frac{3}{16} \lambda^5 - \dots & A_4 &\approx -\frac{\lambda^3}{4} \\
 A_6 &= \frac{9}{128} \lambda^5 + \dots & A_6 &\approx \frac{\lambda^5}{14} \\
 A_8 &= -\frac{1}{39} \lambda^7 - \dots & A_8 &\approx -\frac{\lambda^7}{39}
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Ako se uzmu u obzir samo prva dva harmonika, pogreška neće biti velika jer za vrijednost  $\lambda = 0.25$  treći harmonik iznosi 0.000244. Dakle, približni izraz za pomak klipa od GMT glasi:

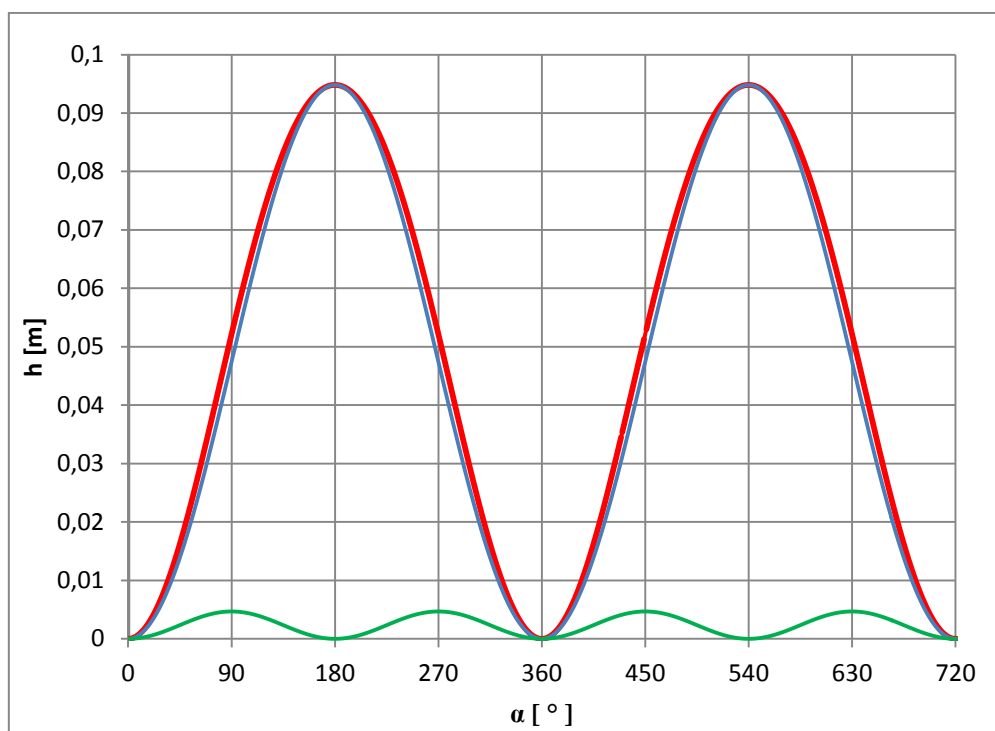
$$\begin{aligned}
 h &\approx r \cdot \left[ 1 + \frac{\lambda}{4} - \cos \alpha + \frac{\lambda}{4} - \cos 2\alpha \right] \\
 \underline{h} &\approx r \cdot \left[ 1 - \cos \alpha + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\alpha) \right]
 \end{aligned} \tag{2.7}$$



**Slika 10. Put klipa u ovisnosti o zakretu KV za različite vrijednosti  $\lambda$**

U izrazu (2.7), dio unutar uglate zagrade  $x = \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\alpha)$  odnosi se na konačnu duljinu klipnjače. Njegov izraz varira, te je u krajnjim točkama GMT i DMT jednak nuli, a najveću vrijednost poprima za kut zakreta KV od  $90^\circ$ .

$$x_{max} \approx r \cdot \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 180^\circ) = r \cdot \frac{\lambda}{2} = \frac{r^2}{2l}$$



**Slika 11. Crveno: put klipa; Plavo: prvi harmonik; Zeleno: drugi harmonik**

Prema slici 11. primjećuje se kako period ponavljanja prvog harmonika iznosi  $2\pi$ , dok je period ponavljanja drugog harmonika ( u ovom slučaju  $x$  ) dvostruko veći i iznosi  $4\pi$ . Kad je koljenasto vratilo zakrenuto za  $\alpha = 90^\circ$  klip nije u sredini između GMT i DMT, nego je pomaknut prema DMT za iznos  $x$ . Bio bi na sredini kad bi klipnjača bila beskonačno dugačka.

## 4.2. Brzina klipa

Brzina klipa  $v$  jednaka je derivaciji puta klipa  $h$  po vremenu:

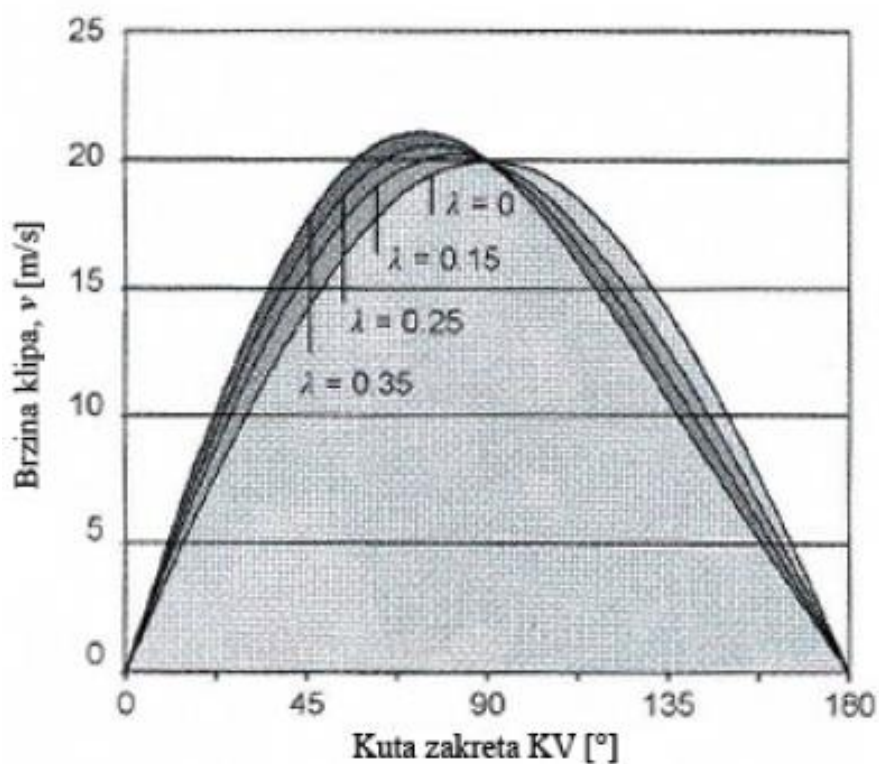
$$v = \frac{dh}{dt} = \frac{dh}{da} \cdot \frac{da}{dt} = \omega \cdot \frac{dh}{da} \quad (2.8)$$

Deriviranjem izraza za put klipa (2.7) dobiva se:

$$v = r \cdot \omega \left( \sin \alpha + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin 2\alpha \right) \quad (2.9)$$

Točan izraz za brzinu klipa dobiva se derivacijom (2.4), te iznosi:

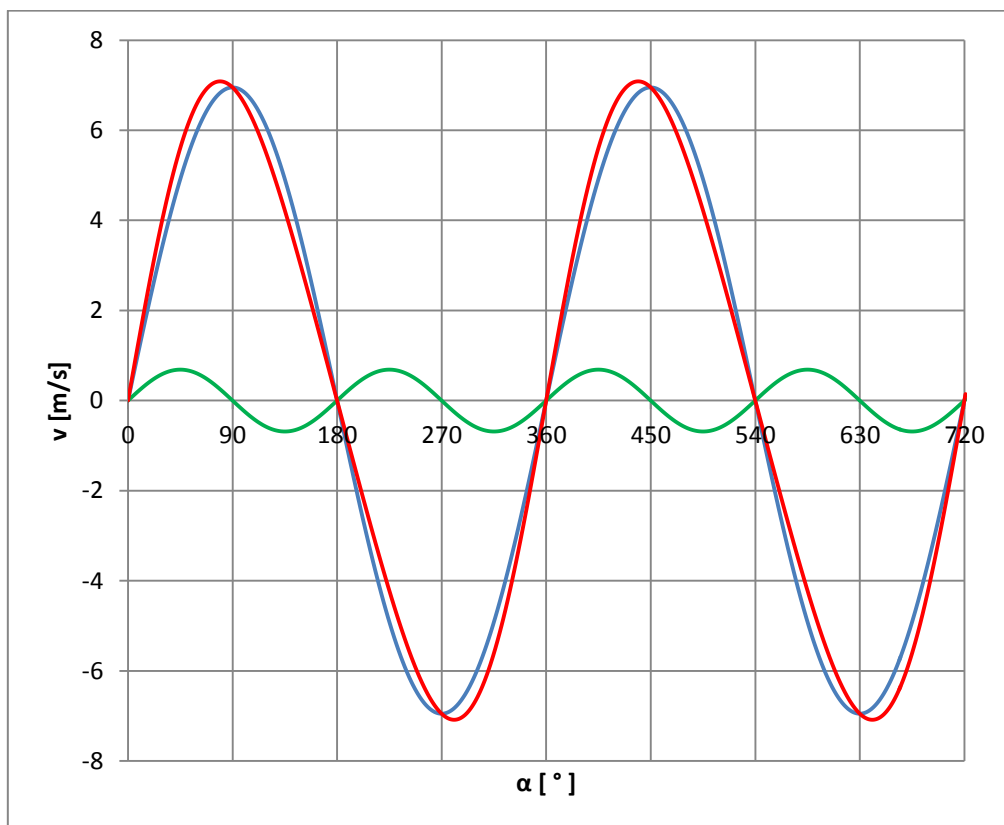
$$v = r \cdot \omega \left( \sin \alpha + \lambda \cdot \frac{\sin 2\alpha}{2\sqrt{1-\lambda^2 \cdot \sin^2 \alpha}} \right) \quad (2.10)$$



Slika 12. Brzina klipa u ovisnosti o zakretu KV za različite vrijednosti  $\lambda$

Srednja brzina klipa je vrlo važan pokazatelj izdržljivosti klipnog mehanizma, točnije sklop klip / karike / cilindar. Računa se prema izrazu:

$$v_{sred} = 2 \cdot H \cdot n$$



**Slika 13. Crveno: brzina klipa; Plavo: prvi harmonik; Zeleno: drugi harmonik**

Srednja brzina klipa se vrlo malo promijenila od pedesetih godina prošlog stoljeća pa do danas. Npr. sredinom 1950-ih je već dostizala 22 m/s, a kod današnjih ( 2009. ) motora Formule-1 ide samo malo više, do 26 m/s. Nekad kao i danas, prekoračenje ovih granica dovodi do naglog povećanja trošenja klipnih karika i cilindra. Srednja brzina klipa manja je kod kratko hodnih motora (  $H/D < 1$  ). Međutim oni se u pravilu vrte brže, zbog većeg promjera klipa veća je masa klipa, pa su kod njih veće sile inercije oscilirajućih masa u klipnome mehanizmu. Današnji motori putničkih automobila su dugohodni (  $H / D > 1$  ), a srednja brzina klipa ide i preko 22 m/s, a trajnost im je povećana poboljšanjem materijala klipa, karike i cilindra.

### 4.3. Ubrzanje klipa

Ubrzanje klipa  $a$  jednako je derivaciji brzine klipa po vremenu:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{d\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt} = \omega \cdot \frac{dv}{d\alpha} \quad (2.11)$$

Derivacijom izraza (2.9) (samo prva dva harmonika) slijedi:

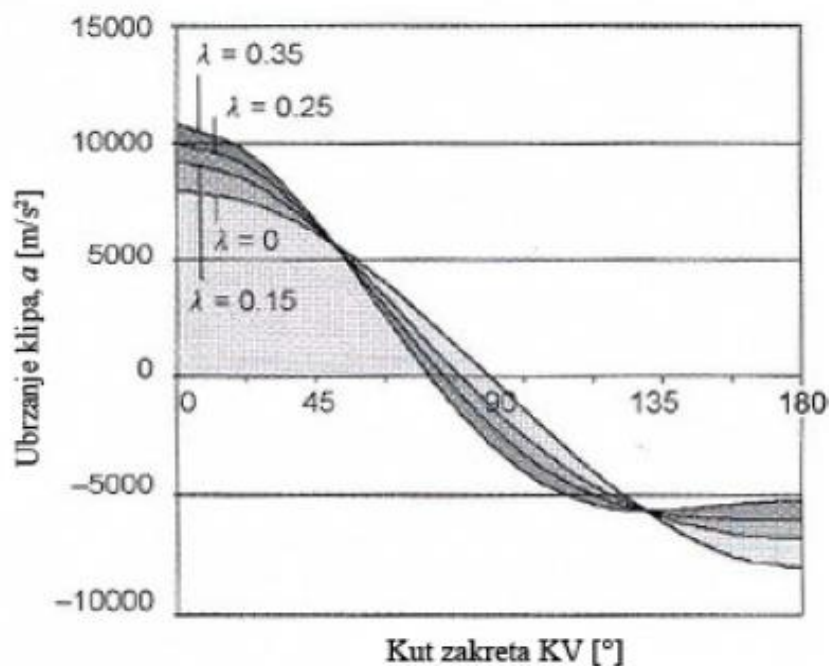
$$a = r \cdot \omega^2 (\cos \alpha + \lambda \cdot \cos 2\alpha) \quad (2.12)$$

gdje je:  $a \approx a_1 + a_2$ :

$$a_1 = r \cdot \omega^2 \cdot \cos \alpha \quad - \text{prvi harmonik}$$

$$a_2 = r \cdot \omega^2 \cdot \lambda \cdot \cos 2\alpha \quad - \text{drugi harmonik}$$

Rastavljanje ubrzanja na harmonike posebno je važno kod izračunavanja inercijskih sila koje djeluju u klipnom mehanizmu uslijed oscilirajućih masa (pravocrtno gibanje).



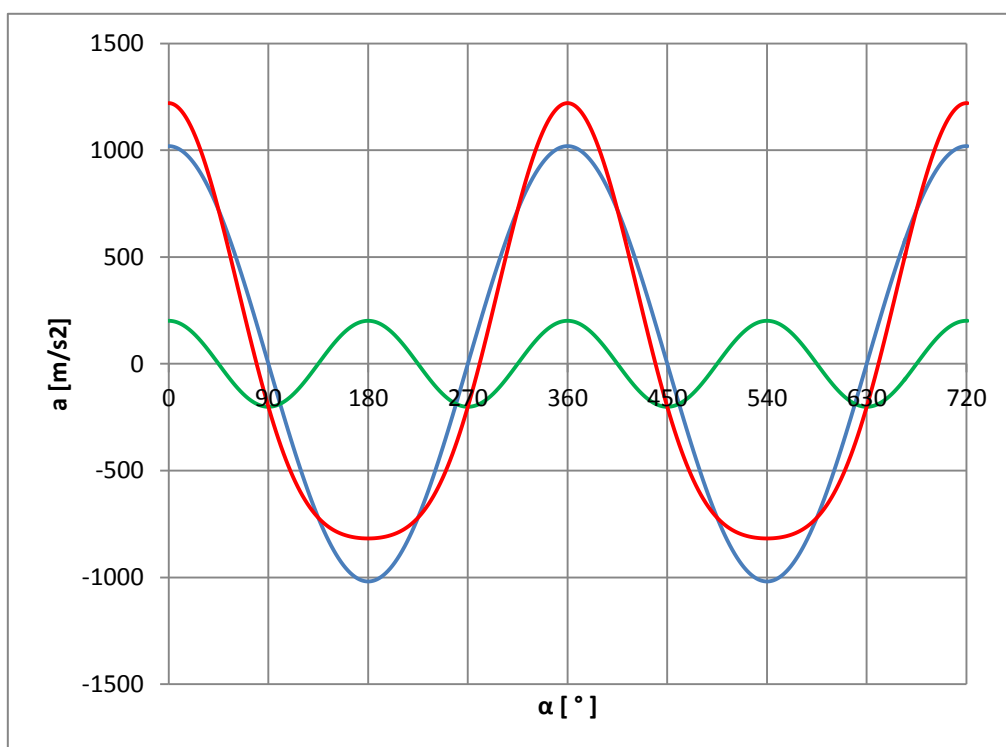
Slika 14. Ubrzanje klipa u ovisnosti o zakretu KV za različite vrijednosti  $\lambda$



U GMT i DMT kut zakreta radilice  $\alpha$  poprima vrijednost  $k \cdot \pi$ , gdje je  $k=0, 1, 2, \dots$ . Ako se ta vrijednost kuta zakreta KV uvrsti u izraz ( 2.12 ), dobiva se omjer ubrzanja klipa u GMT i DMT:

$$\frac{\alpha_{GMT}}{\alpha_{DMT}} \approx \frac{r \cdot \omega^2 (1 + \lambda)}{r \cdot \omega^2 (-1 + \lambda)} = \frac{1 + \lambda}{-1 + \lambda}$$

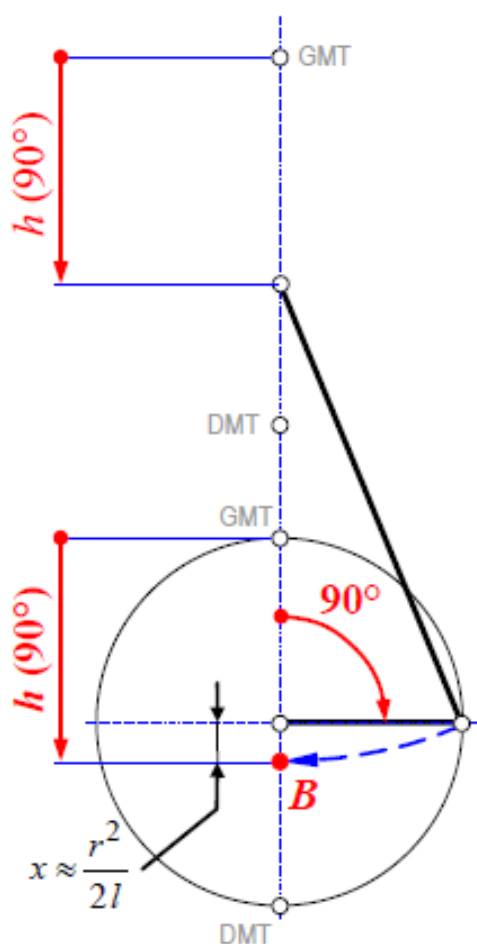
Za uobičajenu vrijednost omjera klipnjače  $\lambda = \frac{1}{4}$  omjer ubrzanja iznosi:  $\frac{\alpha_{GMT}}{\alpha_{DMT}} \approx -\frac{5}{3}$



Slika 15. Crveno: ubrzanje klipa, odnosno oscilirajućih masa  $m_{osc}$

#### 4.4. Brixova točka

Kada je radilica zakrenuta za  $\alpha = 90^\circ$ , klip se zbog konačne duljine klipnjače l ne nalazi u sredini između GMT i DMT ( slika 16. ). Promatrano na kružnici koljenastog vratila, klip je od sredine pomaknut prema DMT za iznos x i nalazi se u točki B, koja se naziva BRIX- ovom točkom. Pomoću Brix-ove točke može se grafički odrediti položaj klipa za bilo koji kut  $\alpha$  bez da se mora nacrtati klipni mehanizam.



### Slika 16. Grafičko određivanje položaja BRIX-ove točke

Ako se koljenasto vratilo nalazi u  $\alpha = 90^\circ$ , te se klip zadrži u svom položaju a klipnjača se otkvači od osnog koljena i pusti da padne na uzdužnu os cilindra, njena velika glava pasti će u BRIX-ovu točku B.

#### 4.5. Gibanje klipnjače

Kutna brzina njihanja klipnjače  $\omega_{\text{klipnj}}$  dobiva se deriviranjem jednakosti

$l \cdot \sin \beta = r \cdot \sin \alpha$  ( vidi sliku 10. ) po vremenu:

$$\sin \beta = \frac{r}{l} \cdot \sin \alpha, \quad \frac{r}{l} = \lambda$$

$$\dot{\beta} \cdot \cos \beta = \lambda \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha, \quad \dot{\alpha} = \omega$$

$$\omega_{\text{klipnj}} = \dot{\beta} = \omega \cdot \lambda \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} = \omega \cdot \lambda \cdot \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}} \quad (2.13)$$

Razvojem u red dobiva se izraz:

$$\omega_{\text{klipnj}} = \dot{\beta} = \omega \cdot \lambda \cdot \left( C_1 \cdot \cos \alpha + \frac{1}{3} C_3 \cdot \cos 3\alpha + \frac{1}{5} C_5 \cdot \cos 5\alpha + \dots \right) \quad (2.13a)$$

gdje je:  $\omega$  – kutna brzina koljenastog vratila:

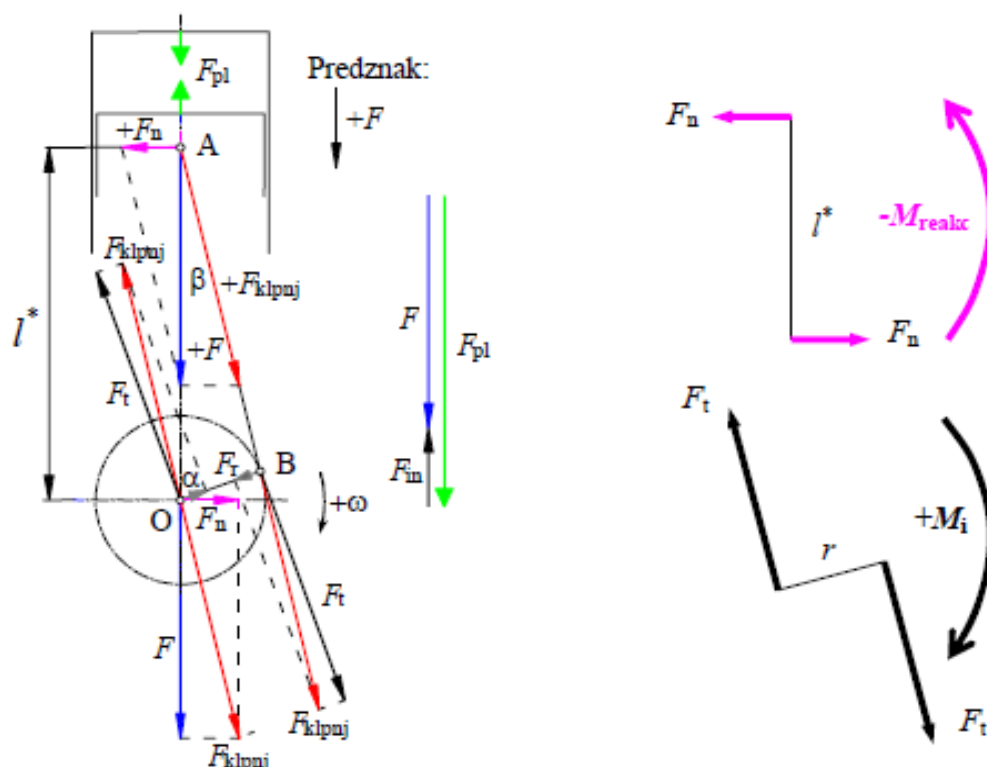
$$C_1 \approx 1, \quad C_3 \approx -\frac{3}{8} \lambda^2, \quad C_5 \approx \frac{1}{8} \lambda^4, \dots$$

Relativna kutna brzina ležaja klipnjače u odnosu na rukavac koljenastog jednaka je:

$$\omega_{\text{lež klipnj}} = \omega + \omega_{\text{klipnj}} = \omega \left( 1 + \frac{\lambda \cdot \cos \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}} \right) \quad (2.14)$$

## 5. Sile u klipnom mehanizmu, moment i snaga kompresora

U klipnom mehanizmu gibanje uzrokuje pogonski stroj preko remenskog prijenosa. Gibanjem dijelova klipnog mehanizma, uslijed ubrzanja, nastaju sile inercije oscilirajućih i rotirajućih masa klipnog mehanizma.



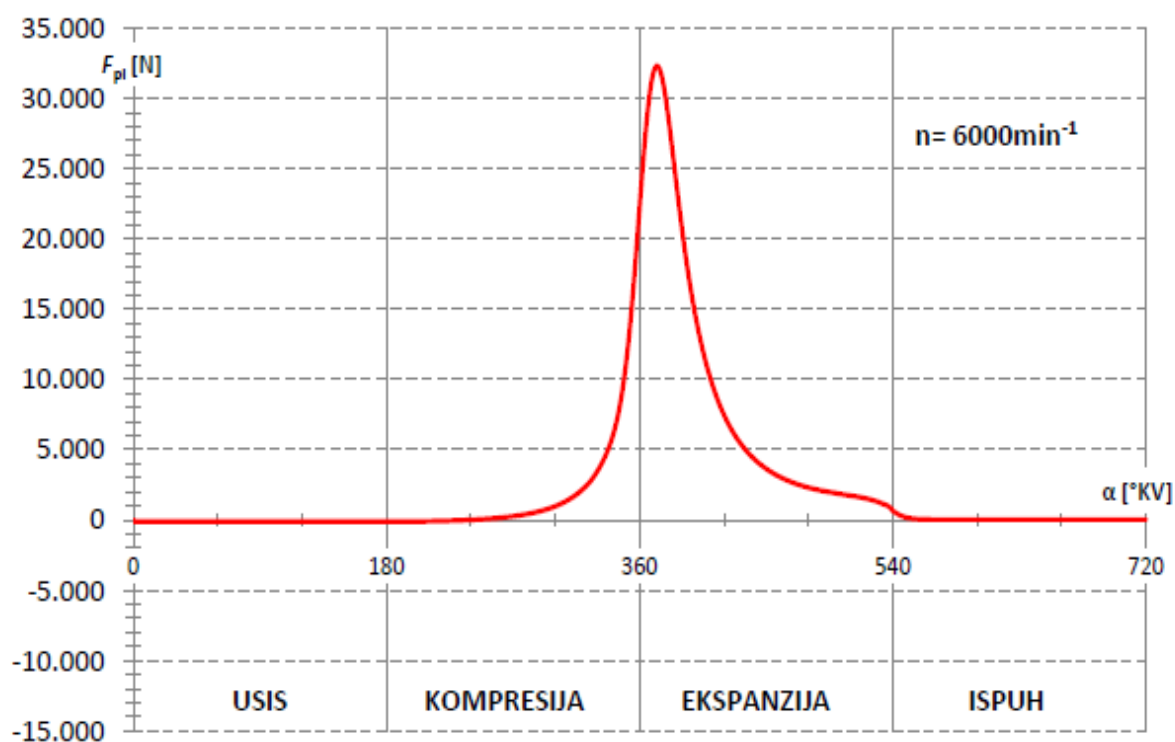
Slika 17. Shematski prikaz klipnog mehanizma

Predznaci sila prema slici 17.: pozitivan smjer sile  $F$  na klip podudara se sa smjerom djelovanja pritiska plinova u taktu ekspanzije. Sve sile koje nastaju uslijed djelovanja pozitivne sile  $F$  također imaju pozitivan predznak. S gornje strane na klip djeluje tlak plinova u cilindru  $p_{cil}(\alpha)$ , a s donje strane tlak  $p_{kuć}$  u kućištu vratila. Tlak u kućištu koljenastog vratila se također mijenja u ovisnosti o kutu zakreta KV  $\alpha$ , ali to u ovom razmatranju nije uzeto u obzir. Tangencijalna sila  $F_t$  ima pozitivan predznak ako potpomaže okretanje koljenastog vratila. Radijalna sila  $F_r$  ima pozitivan predznak kada djeluje od rukavca (koljena) klipnjače prema osi rotacije KV.

Tangencijalna sila  $F_t$  okreće koljenasto vratilo pomoću zakretnog momenta  $F_t \cdot r$ , a radijalna sila  $F_r$  opterećuje glavne ležajeve koljenastog vratila. U osi rotacije O dodana je i oduzeta sila u klipnjači  $F_{klipnj}$  sa čime nije narušena ravnoteža sila u klipnom mehanizmu. Moment reakcije  $F_n \cdot l^*$  preuzimaju oslonci motora.

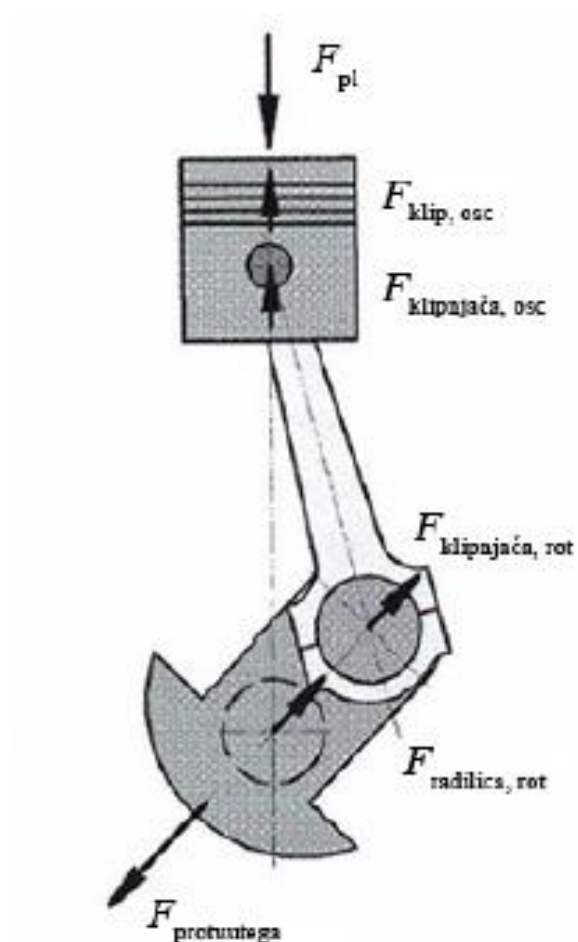
Iz slike 18. može se zaključiti kako je sila plinova  $F_{pl}$  uravnotežena unutar cilindra. Naime, reakcije koje stvara tlak plinova na stjenkama cilindra uravnotežene su unutar kućišta motora zbog toga što tlak djeluje na sve strane jednako unutar samog cilindra.

Moment koji proizvodi sila plinova uravnotežen je otporima u motoru i vanjskim opterećenjem na koljenastom vratilu. S druge strane, nejednolikost sile plinova ima za posljedicu nejednolikost zakretnog momenta a to pojačava vibracije motora u osloncima i uzrok je torzijskih vibracija što kao rezultat stvara zamorne lomove koljenastog vratila.



Slika 18. Sila plinova,  $F_{pl}$

Ostaje dakle, neuravnotežena samo sila inercije  $F_{in}$  oscilirajućih masa i ona izaziva vibracije koje motor kao cjelinu prenosi na oslonce ( karoseriju motora ).

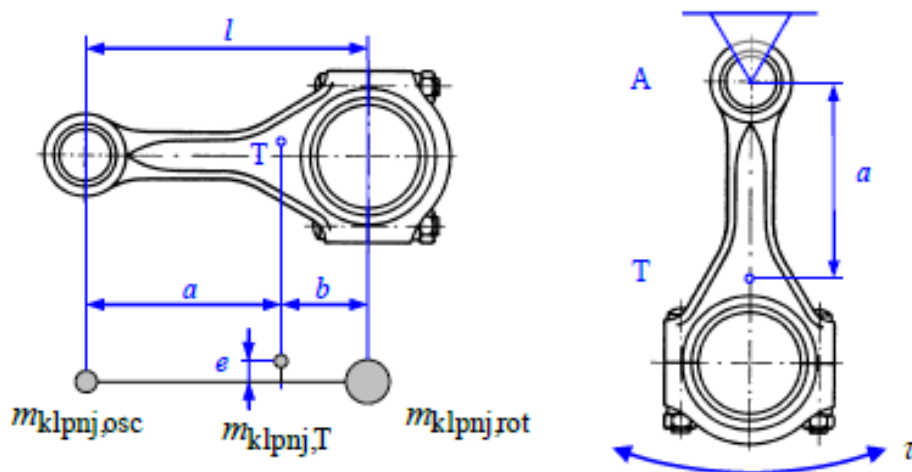


Slika 19. Sila na klip i koljenasto vratilo

### 5.1. Redukcija mase klipnjače

Za proračun sila inercije treba ukupnu masu klipnjače rastaviti načelno na tri koncentrirane mase. Pritom treba zadovoljiti sljedeća tri uvjeta:

1. zbroj reduciranih masa mora biti jednak ukupnoj masi klipnjače  $m_{\text{klipnj}}$ .
2. težište reduciranih masa mora biti u istoj točki T u kojoj je i težište klipnjače.
3. moment inercije reduciranog sustava masa mora biti jednak momentu inercije  $J_{\text{klipnj},T}$  oko njenog težišta.



**Slika 20. Redukcija mase klipnjače i određivanje moment oko težišta T mjerenjem perioda njihanja  $\tau$  klipnjače obješene u osi male glave**

$$J_A = m_{\text{klipnj}} \cdot g \cdot a \cdot \left( \frac{\tau}{2\pi} \right)^2, \text{ kgm}^2 \quad (3.1)$$

$$J_T = J_A - m_{\text{klipnj}} \cdot a^2 \quad (3.2)$$

Ovi se uvjeti mogu ispuniti ako se klipnjača podijeli na tri mase:  $m_{\text{klipnj,osc}}$  smještenu u središtu male glave,  $m_{\text{klipnj,rot}}$  u središtu velike glave i masu  $m_{\text{klipnj,T}}$  u težištu klipnjače. Ova treća masa će biti na udaljenosti  $e$  od uzdužne osi klipnjače. Kod simetričnih klipnjača je  $e = 0$ , ali npr. kod koso podijeljene velike glave težište klipnjače leži izvan uzdužne osi pa je  $e \neq 0$ . Izraženi matematički, spomenuti uvjeti glase:

$$m_{\text{klipnj,osc}} + m_{\text{klipnj,T}} + m_{\text{klipnj,rot}} = m_{\text{klipnj}} \quad (3.3)$$

$$m_{\text{klipnj,osc}} \cdot a - m_{\text{klipnj,rot}} \cdot b = 0 \quad (3.4)$$

$$m_{\text{klipnj,osc}} \cdot (a^2 + e^2) + m_{\text{klipnj,rot}} \cdot (b^2 + e^2) = J_{\text{klipnj,T}} = m_{\text{klipnj}} \cdot r_j^2 \quad (3.5)$$

gdje je:  $r_j$  – polumjer inercije mase klipnjače

Odavde se tri mase izračunavaju pomoću izraza:

$$m_{\text{klipnj,rot}} = \frac{J_{\text{klipnj,T}}}{(bl + e^2 \frac{1}{b})} \quad (3.6)$$

$$m_{\text{klipnj,osc}} = \frac{J_{\text{klipnj,T}}}{(al + e^2 \frac{1}{l})} \quad (3.7)$$

$$m_{\text{klipnj,T}} = m_{\text{klipnj}} - \frac{J_{\text{klipnj,T}}}{(ab + e^2)} \quad (3.8)$$

Iz izraza ( 2.22 ) se vidi da masa  $m_{\text{klipnj,T}}$  može biti negativna a poprimiti će vrijednost nula ako je ispunjen uvjet:

$$\frac{J_{\text{klipnj,T}}}{m_{\text{klipnj}}(ab + e^2)} = 1, \text{ odnosno: } \frac{r_j^2}{(ab + e^2)} = 1 \quad (3.9)$$

Ako su dakle ovi uvjeti ispunjeni te ako je težište sustava reduciranih masa u težištu klipnjače, onda je ispravna podjela klipnjače na dvije reducirane mase čiji zbroj je jednak ukupnoj masi klipnjače:

$$m_{\text{klipnj}} = m_{\text{klipnj,rot}} + m_{\text{klipnj,osc}} \quad (3.10)$$

$$m_{\text{klipnj,rot}} = \frac{J_{\text{klipnj,T}}}{bl} = \frac{m_{\text{klipnj}} \cdot r_j^2}{bl} = \frac{m_{\text{klipnj}} \cdot ab}{bl} = m_{\text{klipnj}} \cdot \frac{a}{l} \quad (3.11)$$

$$m_{\text{klipnj,osc}} = \frac{J_{\text{klipnj,T}}}{al} = \dots = m_{\text{klipnj}} \cdot \frac{b}{l} \quad (3.12)$$



Moment inercije klipnjače određuje se kod projektiranja pomoću računalnog programa u kome je napravljen model klipnjače, a kod analize gotovog motora pokusom, slika 20. klipnjača se objesi na uzdužnoj osi male glave te se zanjiše poput fizičkog njihala i izmjeri se vrijeme  $\tau$  jednog titraja. Na temelju njega se izračuna moment inercije  $J_{\text{klipnj},A}$  oko objesišta A, te se zatim pomoću STEINER – ovog pravila izračuna moment inercije oko težišta.

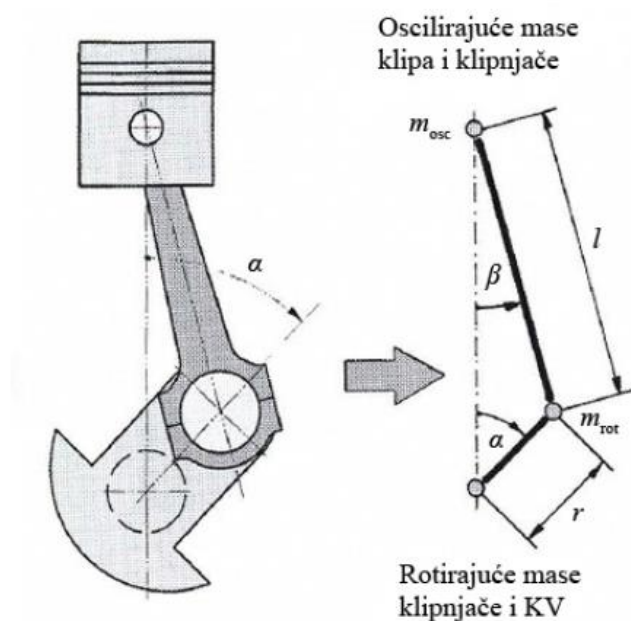
Prema slici 21. :

Pod sumu oscilirajućih masa  $m_{\text{osc}}$  ubrajaju se:

- $m_k$  masa klipa
- $m_{kp}$  masa klipnih prstenova
- $m_{\text{osov}}$  masa osovinice
- $m_{\text{osig}}$  masa osigurača osovinice
- $m_{\text{klipnj,osc}}$  masa dijela klipnjače koji se giba pravocrtno

Pod sumu rotirajućih masa  $m_{\text{rot}}$  ubrajaju se:

- $m_{\text{ruk}}$  masa letećeg rukavca radilice
- $m_{\text{ra}}$  masa koljena ( ramena ) radilice
- $m_{\text{klipnj,rot}}$  masa dijela klipnjače koja rotira



Slika 21. Oscilirajuće i rotirajuće mase klipnog mehanizma

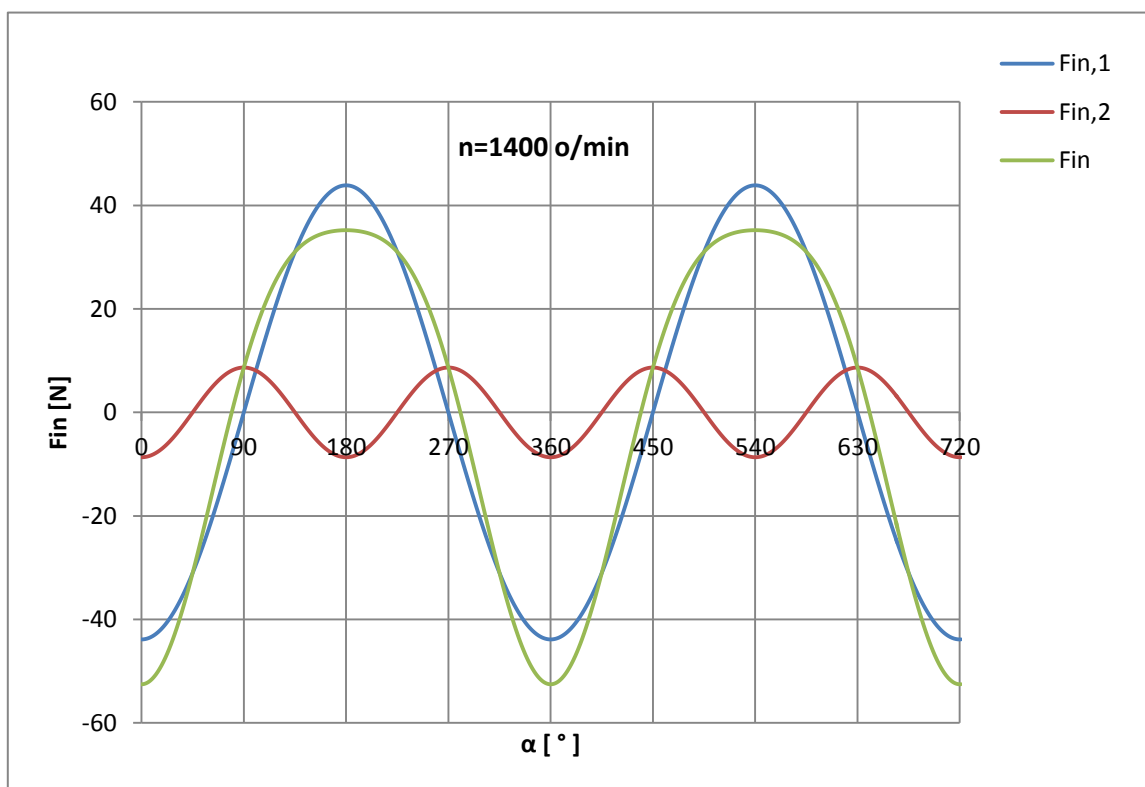
## 5.2. Sile inercije oscilirajućih masa

Sila inercije :

$$1. \text{ reda : } F_{in,1} = -m_{osc} \cdot a_1 = -m_{osc} \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos \alpha \quad (3.13)$$

$$2. \text{ reda: } F_{in,2} = -m_{osc} \cdot a_2 = -m_{osc} \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \lambda \cdot \cos 2\alpha \quad (3.14)$$

$$1. + 2. \text{ reda: } F_{in} = F_{in,1} + F_{in,2} \quad (3.15)$$



Slika 22. Sile inercije oscilirajućih masa

Prema slici 22. može se zaključiti kako inercijske sile oscilirajućih masa mijenjaju svoj iznos i smjer u ovisnosti o kutu zakreta KV (analogno slici 11. )

- Sile inercije 1. reda mijenjaju svoj smjer dva puta za vrijeme jednog radnog ciklusa (period ponavljanja  $2\pi$  )
- Sile inercije 2. reda mijenjaju svoj smjer četiri puta za vrijeme jednog radnog ciklusa (period ponavljanja  $4\pi$  )

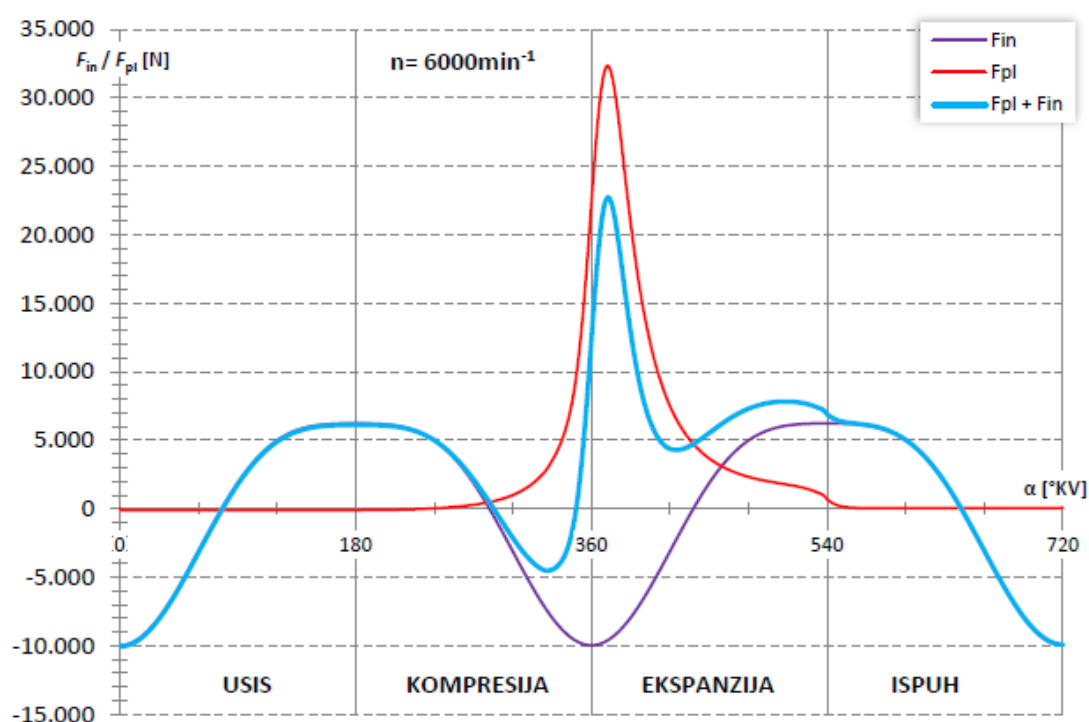
### 5.3. Rezultirajuća sila na klip F

Rezultirajuća sila na klip F sastoji se od sile plinova  $F_{pl}$  i sile inercije oscilirajućih masa

$F_{in}$ :

$$F = F_{pl} + F_{inl} = [p_{cil}(\alpha) - p_{kuć}] \cdot A + F_{in} \quad (3.16)$$

gdje je  $A [m^2]$  – površina poprečnog presjeka cilindra.



Slika 23. Rezultirajuća sila na klip

Inercijske sile u radu motora imaju i pozitivan i negativan učinak. Dok su s jedne strane nepoželjne jer umanjuju snagu klipnih motora, s druge strane one pridonose ujednačavanju izlazne snage klipnog mehanizma na taj način što se suprotstavljaju vršnim vrijednostima sile tlak plinova. Rezultat je smanjenje opterećenja, što se jasno vidi na slici 23.

**5.4. Sila na klipnjaču:**

$$F_{\text{klipnj}} = \frac{F}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \alpha}} \quad (3.17)$$

**5.5. Normalna sila na bok cilindra:**

$$F_n = F_{\text{klipnj}} \cdot \lambda \cdot \sin \alpha \quad (3.18)$$

**5.6. Tangencijalna sila:**

- komponenta uslijed pritiska plinova:

$$F_{t,pl} = [p_{\text{cil}}(\alpha) - p_{\text{kuć}}] \cdot A \cdot \sin \alpha \left( 1 + \frac{\lambda \cdot \sin \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \alpha}} \right) \quad (3.19)$$

- komponenta uslijed sila inercije oscilirajućih masa:

$$F_{t,in} = F_{in} \cdot \sin \alpha \left( 1 + \frac{\lambda \cdot \sin \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \alpha}} \right) \quad (3.20)$$

- rezultirajuća:

$$F_t = F_{t,pl} + F_{t,in} \quad (3.21)$$

**5.7. Radijalna sila:**

- komponenta uslijed pritiska plinova:

$$F_{r,pl} = [p_{\text{cil}}(\alpha) - p_{\text{kuć}}] \cdot A \cdot \left( \cos \alpha - \frac{\lambda \cdot \sin \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \alpha}} \right) \quad (3.22)$$

- komponenta uslijed sila inercije oscilirajućih masa:

$$F_{r,in} = F_{in} \cdot \left( \cos \alpha - \frac{\lambda \cdot \sin \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \alpha}} \right) \quad (3.23)$$

- uslijed centrifugalne sile rotirajućeg dijela klipnjače:

$$F_{r,klipnj} = -m_{\text{klipnj,rot}} \cdot r \cdot \omega^2 \quad (3.24)$$

- rezultirajuća:

$$F_r = F_{r,pl} + F_{r,in} + F_{r,klipnj} \quad (3.25)$$

## 6. Metoda izračuna vibracijskog odziva kompresora

Općenito, vibracije strojeva mogu se opisati manje ili više pravilnim gibanjem pojedinih njegovih čestica oko nekog središnjeg položaja. Na temelju poznatog gibanja, odnosno relativni pomak, mogu se odrediti sile i naprezanja kod poznatih vibracija stroja. Nakon toga je moguće procijeniti jesu li vibracije u dopuštenim granicama ili nisu.

### 6.1. Jednadžbe gibanja

Gibanje je osnovni pojam u klasičnoj mehanici, definiran kao promjena položaja tijela u odnosu na neki sustav ( referentni sustav ) tijekom vremena. Dvije su osnovne vrste gibanja, translacija ili pravocrtno gibanje ( mijenjanje položaja bez promjene rotacije ) i rotacija. Promjena položaja točke tijela u vremenu jest brzina a promjena kuta zakreta u vremenu kod vrtnje tijela oko osi je kutna brzina ( te se veličine mijenjaju samo pod djelovanjem sila ). Jednadžba gibanja je svaka fizikalna jednadžba kojom se opisuje neko gibanje i temelji se na drugom Newtonovom zakonu gibanja, prema kojem se iz izračunatog ili izmjerelog ubrzanja a uvijek može odrediti sila  $F$  koja djeluje na tijelo mase  $m$ .

$$F = m \cdot a \quad ( 4.1 )$$

Najjednostavniji oblik jednadžbe gibanja:

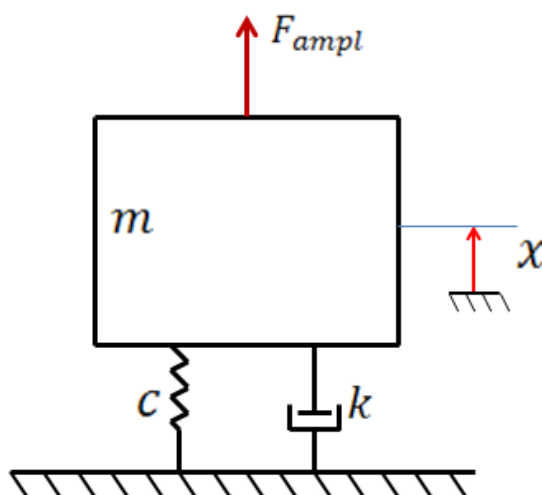
$$m \cdot a = \sum_{i \neq j} F_{ij} \quad ( 4.2 )$$

pri čemu se stvarne stvarne sile koje djeluju na tijelo u smjeru ubrzanja  $a$  uračunavaju s pozitivnim, a one suprotnog smjera negativnim predznakom.

## 6.2. Metoda pretpostavljenog rješenja

### 6.2.1. Rješavanje vibracijskog sustava s jednim stupnjem slobode

Najjednostavniji model mehaničkog vibracijskog sustava s jednim stupnjem slobode prikazan je na slici (24.), i za takav model uobičajen je naziv jednostavan elastično-inercijski sustav. Potrebno je zapamtiti da jednostavan elastično-inercijski sustav može predočavati vrlo složen vibracijski problem ako je cilj proučavanja samo njegovo osnovno ponašanje. U tom slučaju može se smatrati da je konstanta krutosti  $c$  dobivena linearizacijom ne linearne sile u elastičnom elementu. Dakle jednostavan elastično-inercijski sustav ima minimalan broj elemenata potrebnih da bi sustav uopće mogao vibrirati.



Slika 24. Jednostavan elastično–inercijski sustav

Oblik diferencijalne jednadžbe koja opisuje vibracije prigušenih sustava s jednim stupnjem slobode gibanja je:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (5.1)$$

Ovu prethodnu diferencijalnu jednadžbu podijeliti ćemo s masom  $m$  i time dobivamo:

$$\ddot{x} + \frac{c}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = 0 \quad (5.2)$$

Opće rješenje ovog sustava je:

$$x(t) = Be^{\Delta t} \quad (5.3)$$

Ako sada deriviramo prethodno definirano opće rješenje dobiti ćemo:

$$\dot{x}(t) = B\alpha e^{\Delta t} \quad (5.4)$$

$$\ddot{x}(t) = B\alpha^2 e^{\Delta t} \quad (5.5)$$

Sada ćemo prvu i drugu derivaciju općeg rješenja uvrstiti u diferencijalnu jednadžbu i time dobivamo:

$$B\alpha^2 e^{\Delta t} + \frac{c}{m}B\alpha e^{\Delta t} + \frac{k}{m}Be^{\Delta t} = 0 \quad (5.6)$$

$$\alpha^2 + \frac{c}{m}\alpha + \frac{k}{m} = 0 \quad (5.7)$$

Rješenje prethodne jednadžbe glasi:

$$\alpha_{1,2} = \frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad (5.8)$$

Iz prethodne jednadžbe može se zaključiti da ako je diskriminanta pozitivna tada će rješenje kvadratne jednadžbe imati dva realna rješenja. Međutim ako je diskriminanta negativna tada će rješenje kvadratne jednadžbe biti konjugirano kompleksno. Ako je diskriminanta jednaka nuli tada će rješenje kvadratne jednadžbe biti dvostruki realni korijen. Fizikalna priroda vibracija ovisi o predznaku diskriminante. Kada je diskriminanta jednaka nuli radi se o posebnom slučaju i događa se kod određenih kombinacija parametara. Takva vrsta prigušenja kada je determinanta jednaka nuli naziva se kritično prigušenje. Za određene vrijednosti  $k$  i  $m$ , vrijednost  $c$  koja dovodi do kritičnog prigušenja naziva se koeficijentom kritičnog prigušenja i označava se  $C_c$ .

$$c_c = 2\sqrt{km} \quad (5.9)$$

Bezdimenzionalni omjer prigušenja  $\zeta$ , definira se kao omjer stvarne vrijednosti  $c$  i kritičnog koeficijenta prigušenja ili:

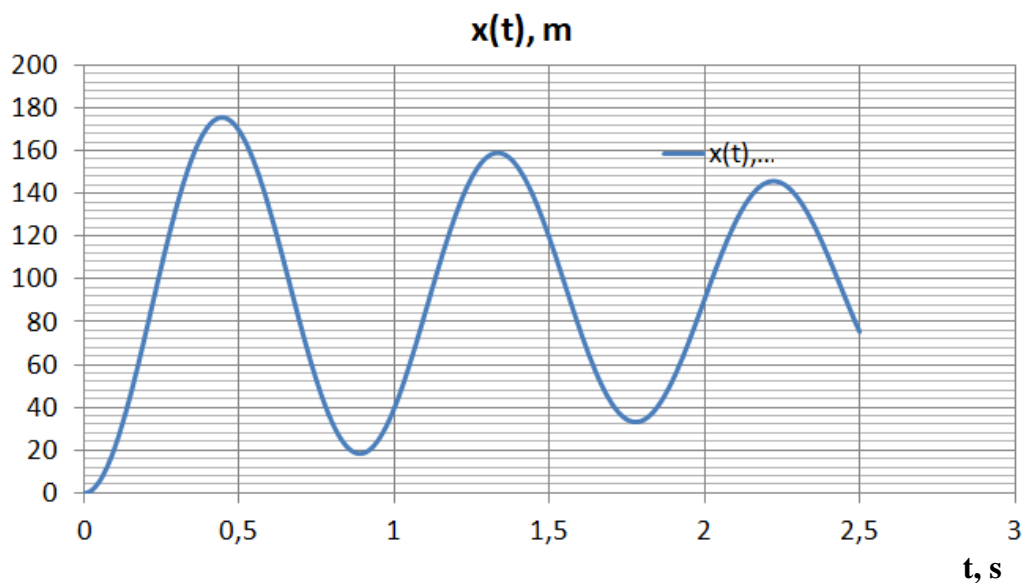
$$\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (6.0)$$

Sada ćemo uvrstiti bezdimenzionalni omjer prigušenja u prethodnu jednadžbu i time dobivamo:

$$\alpha_{1,2} = -\zeta\omega_R \pm \omega_R\sqrt{\zeta^2 - 1} \quad (6.1)$$

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_R\dot{x} + \omega_R^2x = 0 \quad (6.2)$$

Jednadžba 6.2 predstavlja standardnu formu diferencijalne jednadžbe koja opisuje slobodne vibracije sustava s jednim stupnjem slobode gibanja s viskoznim prigušenjem.



Slika 25. Graf vibracijskog odziva sustava s 1 stupnjom slobode gibanja



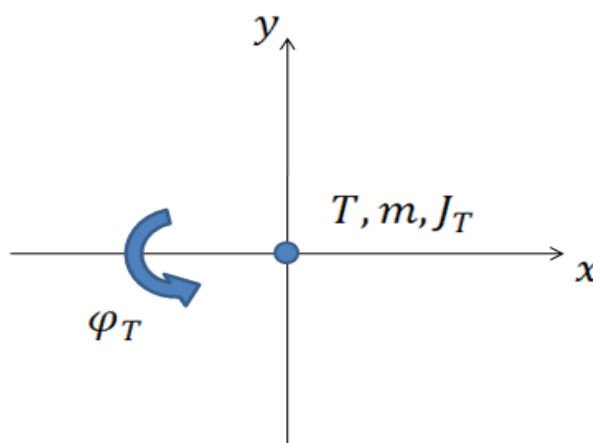
### 6.2.2. Rješavanje vibracijskog sustava s tri stupnja slobode gibanja

Pretpostavljeno rješenje:

$$u_T = A_u + B_u \bar{t} + C_u \bar{t}^2 + D_u \bar{t}^3 \quad \text{jednadžba pomaka težišta po osi "x"} \quad (6.3)$$

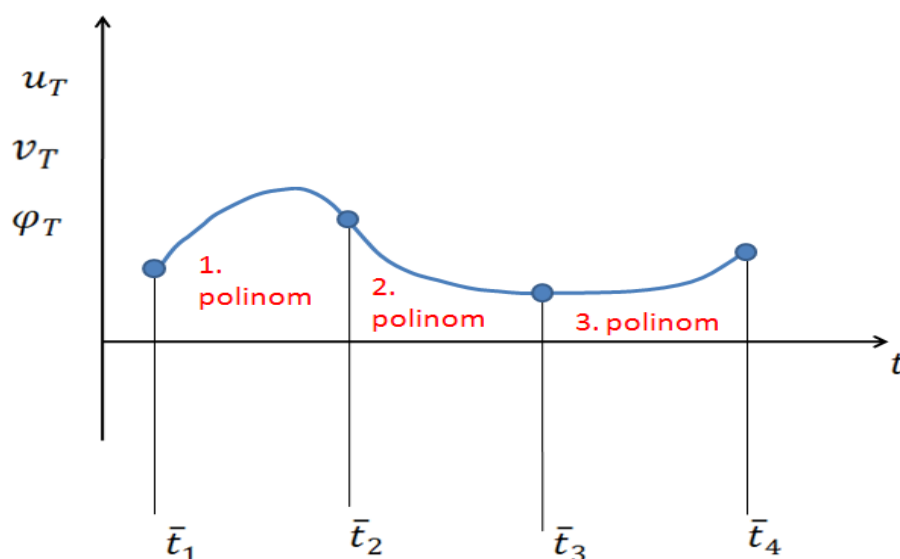
$$v_T = A_v + B_v \bar{t} + C_v \bar{t}^2 + D_v \bar{t}^3 \quad \text{jednadžba pomaka težišta po osi "y"} \quad (6.4)$$

$$\varphi_T = A_\varphi + B_\varphi \bar{t} + C_\varphi \bar{t}^2 + D_\varphi \bar{t}^3 \quad \text{jednadžba zakreta oko osi kroz težište "z"} \quad (6.5)$$



Slika 26. Prikaz u koordinatnom sustavu

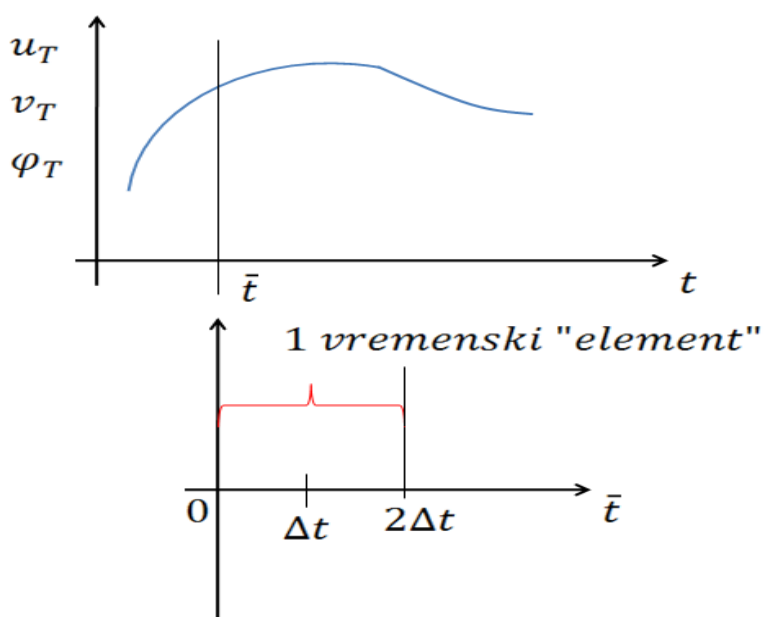
U jednadžbama (6.3) do (6.5)  $\bar{t}$  označava relativno vrijeme, koje je u svakom vremenskom koraku izračunato od nule. Princip pretpostavljenog rješenja oblika prikazanog jednadžbama (6.3) do (6.5) je po dijelovima interpolacija kubnom parabolom. Razlika od „obične“ funkcije je ta da imamo tri stupnja ( funkcije ) slobode koje istovremeno moramo rješavati.



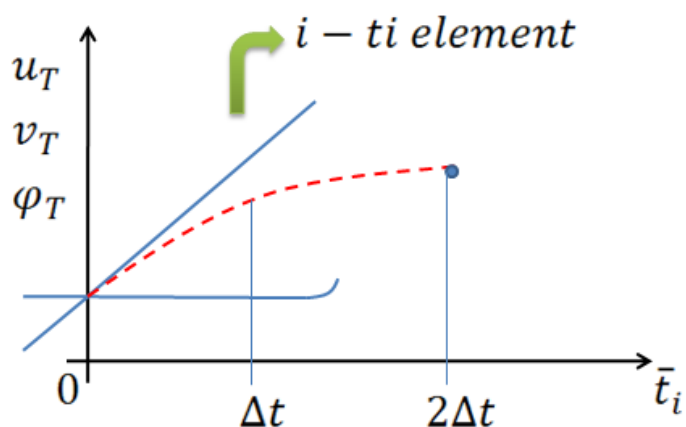
Slika 27. Rješenje domene po dijelovima vremenske domene

Uvjeti „spajanja” po dijelovima funkcija je izjednačavanje vrijednosti funkcije i njene derivacije na kraju jednog ( $i$ -tog) dijela i ( $i + 1$ -og) dijela vremenske domene. Preostale dvije jednačbe za jednu funkciju u jednom vremenskom elementu jesu jednačbe ravnoteže (gibanja).

$\bar{t} = t - konst. \Rightarrow$  vremenski korak koji počinje u određenom trenutku, "komad" vremena, u kojem tražimo rješenje kad uzimamo kao pretpostavljeno rješenje polinom 3. stupnja. Uz to pretpostavimo uvjete interpolacije vrijednosti funkcije i uvjet derivacije (pomak i brzina), ostaju dvije vrijednosti za izračunati (2 konstante iz gornje jednačbe). Svaka od komponenata pomaka ( $u_T, v_T, \varphi_T$ ) opisujemo na isti način, polinomom. Svaki od tih polinoma ima različite konstante ( $A_u, A_v$  i  $A_\varphi$  itd.) na svakom od "komada" vremena. Te komade možemo zvati zakrpe, elementi ili nekako drugačije.



Slika 28. Prikaz vremenskog elementa

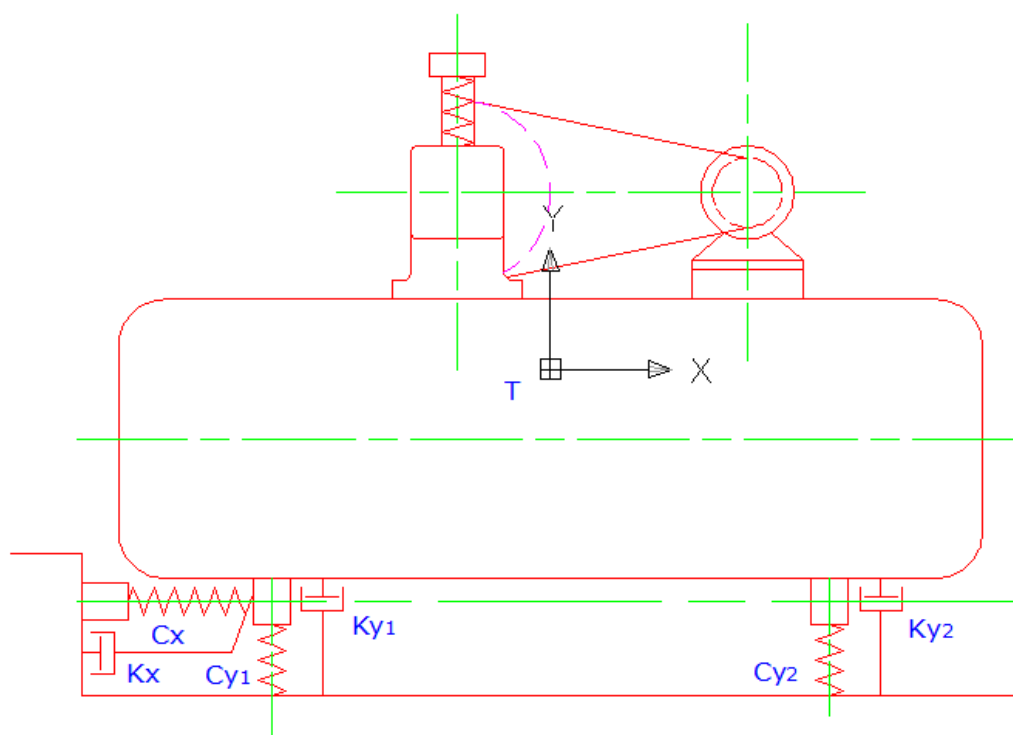


Slika 29. Graf s i-tim elementom

Vrijednost funkcije koju izjednačavamo sa vrijednosti  $2\Delta t$  za  $(i - 1)$  - ti element. Derivacija funkcije (brzina) koju izjednačavamo s vrijednosti brzine prethodnog elementa. Ostale dvije jednadžbe postavljamo jednadžbe ravnoteže (jednadžbe gibanja) u  $\Delta t$  i  $2\Delta t$ .

### 6.2.3. Matematički model vibracijskog odziva

Za matematički model matrice potrebna nam je najprije skica kompresora sa ucrtanim silama, krutostima opruga koje su na kompresoru, i viskoznim prigušenjem koje djeluje na kompresor. Pomoću tih ucrtanih sila, krutosti i prigušenja moći ćemo ispisati jednadžbe gibanja koje opisuju klipni kompresor. Nakon ispisivanja jednadžbi gibanja sastavlja se matrica, koja se upisuje u Microsoft Office Excel-u, gdje će se unutar programa dobivati potrebni izračuni.



Slika 30. Skica klipnog kompresora u koordinatnom sustavu

Podaci koji su korišteni za proračun vibracijskog odziva kompresora sa tri stupnja slobode gibanja su masa klipa ( $m = 0,5 \text{ kg}$ ), masa klipnjače ( $m = 0,22 \text{ kg}$ ), krutost ( $c_x = 1000 \text{ N/m}$ ,  $c_y = 10000 \text{ N/m}$ ), viskozno prigušenje ( $k = 50 \text{ Ns/m}$ ,  $k_x = 100 \text{ Ns/m}$ ,  $k_y = 100 \text{ Ns/m}$ ). Brzina vrtnje motora  $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ , prethodno izračunati moment inercije u točki T ( $J_T$ )  $80,4 \text{ kgm}^2$ . Te početni uvjeti za položaj težišta, koji iznose  $u^0 = 0 \text{ m}$ ,  $v_x^0 = 0 \text{ m/s}$ ,  $v^0 = 0 \text{ m/s}$ ,  $v_y^0 = 0 \text{ m/s}$ ,  $j^0 = 0 \text{ rad}$ ,  $w^0 = 0 \text{ rad}$ . Na temelju što zadanih što proračunatih podataka, ispisujemo jednadžbe gibanja kako bi u programu Microsoft Office Excel-u mogli sastaviti matricu iz koje onda dobivamo vibracijski odziv klipnog kompresora.

Jednadžbe gibanja:

$$\sum F_x = 0 \quad F_{in,h} = m_{uk} \cdot a_x + k_x \cdot v_x + c_x \cdot u_t$$

$$\sum F_y = 0 \quad F_{in,v} = m_{uk} \cdot a_y + k_y \cdot (2v_y + \omega_T(d_2 - d_1)) + c_y \cdot (2v_T + \varphi_T(d_2 - d_1))$$

$$\sum M_Z^T = 0 \quad M_{in} + F_{in,h} \cdot a + F_{in,v} \cdot c - J_T \varepsilon_T + k_y \cdot (v_y - \omega_T d_1) \cdot d_1 +$$

$$c_y \cdot (v_T - \varphi_T d_1) \cdot d_1 - k_y \cdot (v_y + \omega_T d_2) \cdot d_2 - c_y \cdot (v_T + \varphi_T d_2) \cdot d_2 = 0$$

$$M_{in} + F_{in,h} \cdot a + F_{in,v} \cdot c = J_T \varepsilon_T + k_y \cdot [(v_y + \omega_T d_2) \cdot d_2 - (v_y - \omega_T d_1) \cdot d_1] - c_y \cdot [(v_T + \varphi_T d_2) \cdot d_2 - (v_T - \varphi_T d_1) \cdot d_1]$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{3,1} & k_{3,2} & k_{3,3} & k_{3,4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{4,1} & k_{4,2} & k_{4,3} & k_{4,4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{7,5} & k_{7,6} & k_{7,7} & k_{7,8} & k_{7,9} & k_{7,10} & k_{7,11} & k_{7,12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{8,5} & k_{8,6} & k_{8,7} & k_{8,8} & k_{8,9} & k_{8,10} & k_{8,11} & k_{8,12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{11,5} & k_{11,6} & k_{11,7} & k_{11,8} & k_{11,9} & k_{11,10} & k_{11,11} & k_{11,12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{12,5} & k_{12,6} & k_{12,7} & k_{12,8} & k_{12,9} & k_{12,10} & k_{12,11} & k_{12,12} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \\ D_1 \\ A_2 \\ B_2 \\ C_2 \\ D_2 \\ A_3 \\ B_3 \\ C_3 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_T^0 \\ v_x^0 \\ F_{in,h}(\Delta t) \\ F_{in,h}(2\Delta t) \\ v_T^0 \\ v_y^0 \\ F_{in,v}(\Delta t) \\ F_{in,v}(2\Delta t) \\ \varphi_T^0 \\ \omega_T^0 \\ M_{in}(\Delta t) + F_{in,h}(\Delta t)a + F_{in,v}(\Delta t)c \\ M_{in}(2\Delta t) + F_{in,h}(2\Delta t)a + F_{in,v}(2\Delta t)c \end{bmatrix}$$

Slika 31. Zapis u matričnom obliku

$$k_{3,1} = c_x;$$

$$k_{3,2} = c_x \Delta t + k_x;$$

$$k_{3,3} = c_x \Delta t^2 + 2k_x \Delta t + 2m;$$

$$k_{3,4} = c_x \Delta t^3 + 3k_x \Delta t^2 + 6m \Delta t;$$

$$k_{7,5} = 2c_y;$$

$$k_{7,6} = 2c_y \Delta t + k_y;$$

$$k_{7,7} = 2c_y \Delta t^2 + 4k_y \Delta t + 2m;$$

$$k_{7,8} = 2c_y \Delta t^3 + 6k_y \Delta t^2 + 6m \Delta t;$$

$$k_{4,1} = c_x;$$

$$k_{4,2} = c_x 2\Delta t + k_x;$$

$$k_{4,3} = c_x (2\Delta t)^2 + 4k_x \Delta t + 2m;$$

$$k_{4,4} = c_x (2\Delta t)^3 + 3k_x (2\Delta t)^2 + 12m \Delta t;$$

$$k_{7,9} = c_y (d_2 - d_1);$$

$$k_{7,10} = (c_y \Delta t + k_y) \cdot (d_2 - d_1);$$

$$k_{7,11} = (c_y \Delta t^2 + 2k_y \Delta t) \cdot (d_2 - d_1);$$

$$k_{7,12} = (c_y \Delta t^3 + 3k_y \Delta t^2) \cdot (d_2 - d_1);$$

$$k_{8,5} = 2c_y;$$

$$k_{8,9} = c_y(d_2 - d_1);$$

$$k_{8,6} = 4c_y\Delta t + k_y;$$

$$k_{8,10} = (c_y 2\Delta t + k_y) \cdot (d_2 - d_1);$$

$$k_{8,7} = 2c_y(2\Delta t)^2 + 8k_y\Delta t + 2m;$$

$$k_{8,11} = (c_y(2\Delta t)^2 + 4k_y\Delta t) \cdot (d_2 - d_1);$$

$$k_{8,8} = 2c_y(2\Delta t)^3 + 6k_y(\Delta t)^2 + 12m\Delta t;$$

$$k_{8,12} = (c_y(2\Delta t)^3 + 3k_y(2\Delta t)^2) \cdot (d_2 - d_1);$$

$$k_{11,5} = c_y \cdot (d_2 - d_1);$$

$$k_{11,9} = c_y \cdot (d_1^2 + d_2^2);$$

$$k_{11,6} = (c_y 2\Delta t + k_y) \cdot (d_2 - d_1);$$

$$k_{11,10} = (c_y\Delta t + k_y) \cdot (d_1^2 + d_2^2);$$

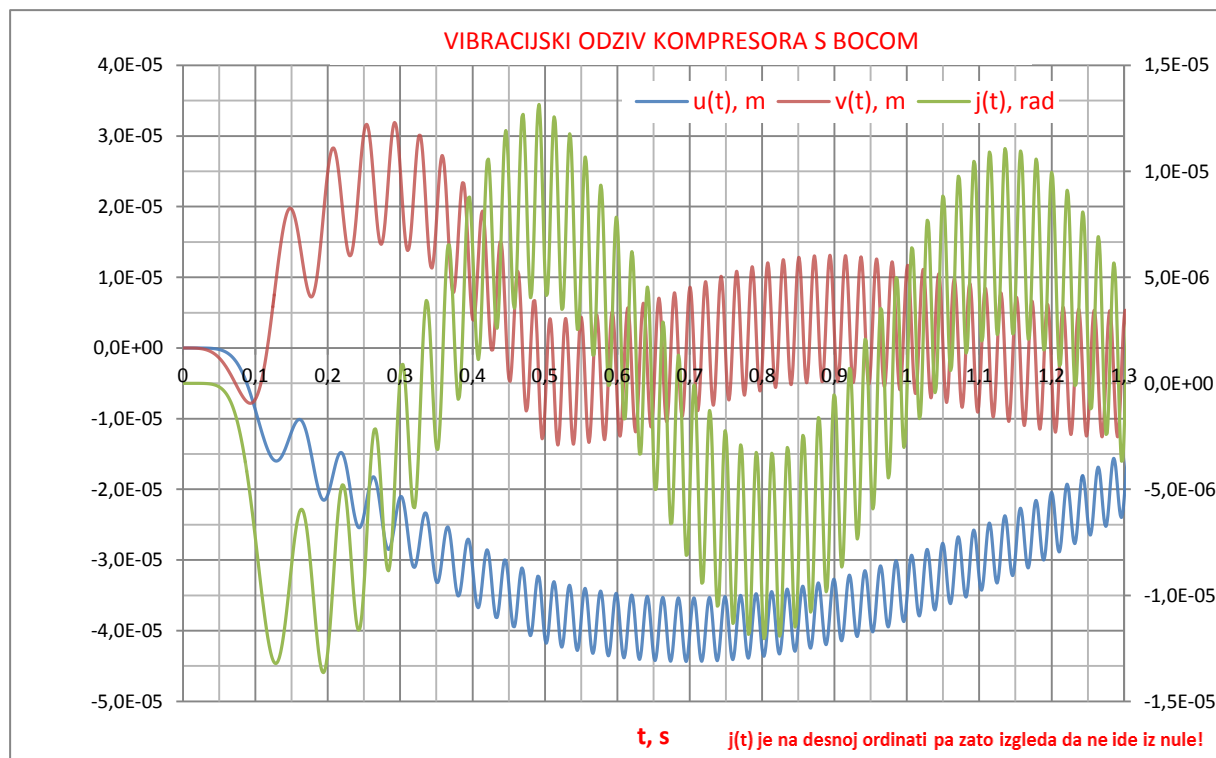
$$k_{11,7} = (c_y\Delta t^2 + 2k_y\Delta t) \cdot (d_2 - d_1);$$

$$k_{11,8} = (c_y\Delta t^3 + 3k_y\Delta t^2) \cdot (d_2 - d_1);$$

$$k_{11,11} = (c_y\Delta t^2 + 2k_y\Delta t) \cdot (d_1^2 + d_2^2) + 2J_T;$$

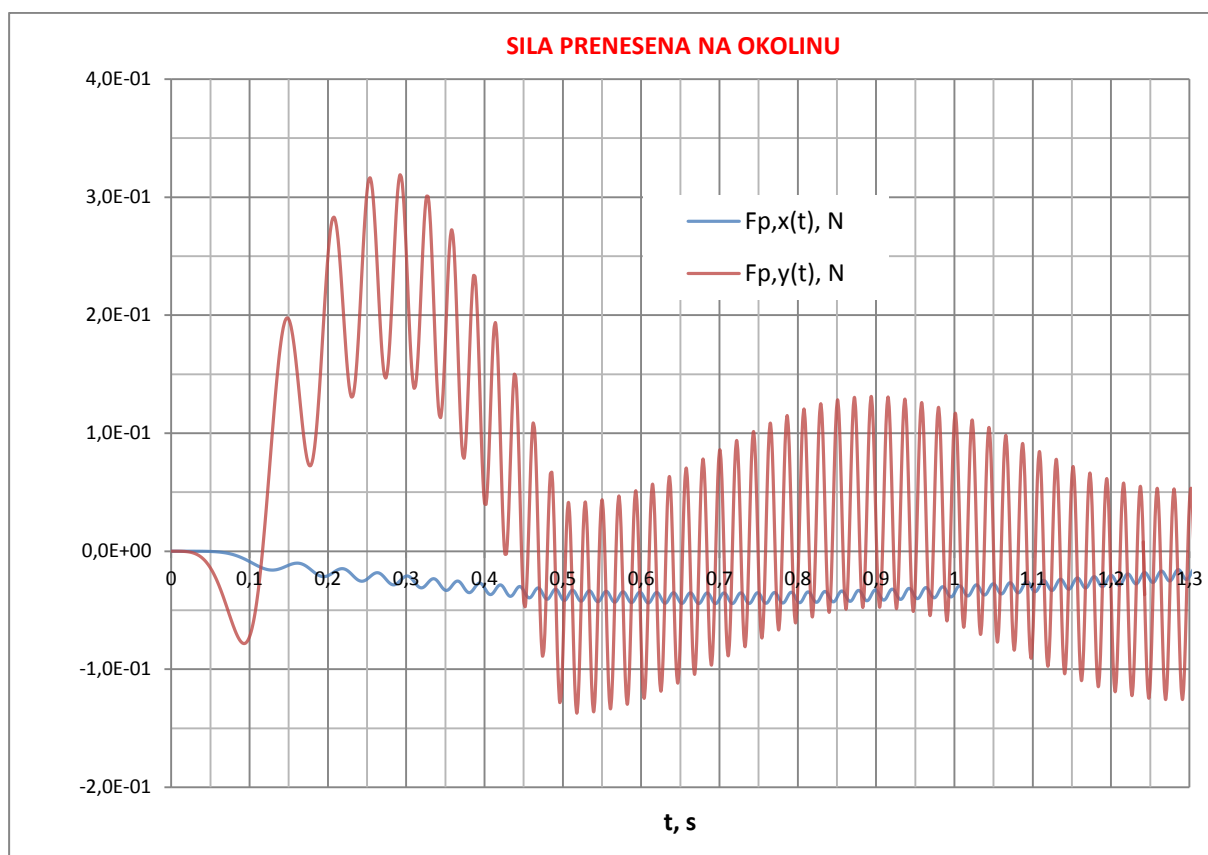
$$k_{11,12} = (c_y\Delta t^3 + 3k_y\Delta t^2) \cdot (d_1^2 + d_2^2) + 6J_T\Delta t;$$

### 6.3. Konačno rješenje vibracijskog odziva klipnog kompresora



Slika 32. Vibracijski odziv kompresora s bocom

Na slici (32.) je prikazan graf sa konačnim rješenjem vibracijskog odziva klipnog kompresora s tri stupnja slobode gibanja. Na grafu su ucrtane tri krivulje za sva tri slobodna gibanja. Horizontalna komponenta pomaka je označena sa  $u(t)$  i ucrtana krivulja na grafu je plave boje. Crvena krivulja ucrtana na grafu predstavlja vertikalnu komponentu pomaka i označena je sa  $v(t)$ . Komponenta koja predstavlja kutni zakret ( $\varphi$  kut) oko osi kroz središte koljenastog vratila na grafu je ucrtana zelenom krivuljom i označena je oznakom  $j(t)$ . Sa grafa je vidljivo da se najveći pomak događa u kutnom zakretu pri vibracijama klipnog kompresora. Za ovaj proračun vibracijskog odziva klipnog kompresora vremenski intervali su podijeljeni na 0,1 sekundu.



Slika 33. Sila prenesena na okolinu

Slika (33.) prikazuje graf koji opisuje prijenos sila na samu konstrukciju kompresora. Plava krivulja predstavlja sile prenesene na konstrukciju klipnog kompresora u smjeru osi (z) i označena je oznakom  $F_{p,x}(t)$ . Sila prenesena na konstrukciju u smjeru (y) je ucrtana na grafu crvenom bojom i označena je oznakom  $F_{p,y}(t)$ , upravo sila koja djeluje na (y) os je puno veća od sile koja djeluje na os (z) klipnog kompresora u vremenu ( $t$ ). U programu Microsoft Office Excel-u se nalaze proračuni za ovaj i prethodni primjer iz kojih su i dobiveni priloženi grafovi.



## 7. ZAKLJUČAK

Teško je zamisliti suvremenu industrijsku proizvodnju, a i ostala područja gospodarstva i života bez upotrebe komprimiranih medija, dakle i kompresora. Kompresori uz pumpe, elektromotore i motore s unutrašnjim izgaranjem udahnuju život mnogim strojarskim instalacijama. Jednostavno rečeno kompresori su naprave koje usisavaju plinove iz nekog spremnika, cjevovoda ili okoline i tlače ih u drugi spremnik, cjevovod ili općenito do nekog potrošača. Najveći nedostaci klipnih kompresora su ti što zahtijevaju dobro temeljenje radi preuzimanja (neuravnoteženih) inercijskih sila klipova i klipnjača te je potrebno iskusno osoblje za održavanje. Svi ti nedostaci predstavljaju dodatne zahtjeve za kompresore. Loše izvedeno temeljenje može dovesti do povećanih neželjenih vibracija koje dovode do zagrijavanja. Velika većina kompresora pogonjena je elektromotorima. Pogon je najčešće ostvaren posredno remenskim prijenosom. Remeni moraju zadovoljiti sve zahtjeve sukladno normi HRN EN 13463-1:2009 odnosno CLC/TR 50404 . Također, pogon može biti ostvaren izravno putem spojke. U tom slučaju potrebno je voditi računa o centriranju pogonskog stroja (elektromotor) i gonjenog stroja (kompresor) da se spriječi pojava vibracija. Vibracije koje nisu normalna pojava mogu dovesti do stvaranja potencijalno opasnih vrućih površina ili mehanički generiranih iskri. Općenito, vibracije strojeva mogu se opisati manje ili više pravilnim gibanjem pojedinih njegovih čestica oko nekog središnjeg položaja. Na temelju poznatog gibanja mogu se odrediti sile i naprezanja kod poznatih vibracija stroja. Nakon toga je moguće procijeniti jesu li vibracije u dopuštenim granicama ili nisu.

## **LITERATURA**

- [1] Radoslav Korbar: Pneumatika i Hidraulika, Veleučilište u Karlovcu, 2007
- [2] [www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1382366949-0-kompresorizraka.pdf](http://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1382366949-0-kompresorizraka.pdf)
- [3] Decker, K. H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 1975.
- [4] Herold, Z.: Računalna i inženjerska grafika, Zagreb, 2003.
- [5] <http://linearvibrations.blogspot.hr/2013/01/vibracije-prigusenih-sustava-s-jednim.html>
- [6] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [7] [https://www.fsb.unizg.hr/miv/MSUI/KonMot/KonMot\\_2015/1\\_Predavanja/KonMot\\_2015.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/miv/MSUI/KonMot/KonMot_2015/1_Predavanja/KonMot_2015.pdf)